



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

MODERNÍ POVRCHOVÉ ÚPRAVY TLAKOVÝCH FOREM

ON THE MODERN SURFACE TREATMENT OF PRESSURE CASTING DIES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ŠTĚPÁN ČERNÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. MIROSLAV PÍŠKA, CSc.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Štěpán Černý

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303R002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Moderní povrchové úpravy tlakových forem

v anglickém jazyce:

On the modern surface treatment of pressure casting dies

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rozbor moderních povrchových úprav tlakových forem pro zvýšení jejich odolnosti, návrh úpravy pro vybranou formu, ověření.

Cíle bakalářské práce:

Úvod

1. Teoretický rozbor problému
2. Navržené varianty řešení
3. Experimentální zkoušky
4. Diskuze výsledků
5. Závěry

Seznam odborné literatury:

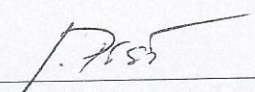
- M.G.J. Veprek-Heijman, S. Vepřek. Industrial applications of superhard nanocomposite coatings. Surface & Coatings Technology 202 (2008), pp. 5063-5073
- Vepřek, S., Veprek-Heijman, M.J.G., Holubář, P., Cselle, T., Galassi, I., Píška, M. Applications of Hard and Superhard Nanocomposite Coatings on Tools for Machining, Forming and Stamping - A Guide for SMEs, 3/2011; VINI (The Virtual Institute of Nano Films)
- Musil, J.: Hard nanocomposite coatings: Thermal stability, oxidation resistance and toughness. Surface & Coatings Technology 207 (2012), pp.50-65.
- Sam Zhang*, Deen Sun, Yongqing Fu, Hejun Du. Recent advances of superhard nanocomposite coatings: a review Surface and Coatings Technology 167, (2003), pp. 113-119
- HUMÁR, Anton. Materiály pro řezné nástroje. Praha. MM publishing s. r.o. 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.

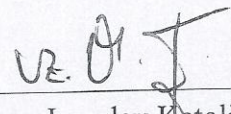
Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/15.

V Brně, dne 19.11.2014




prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu


doc. Ing. Jaroslav Klatolický, Ph.D.
Děkan

ABSTRAKT

Bakalářská práce je zaměřena na vliv povrchových úprav na prodloužení životnosti a snížení množství servisních hodin u forem pro tlakové lití slitin hliníku. Teoretický rozbor problému se zabývá požadavky na nástrojové materiály pro výrobu těchto forem. Dále pak nejčastěji užívanými materiály při jejich výrobě a druhy nejběžněji odlévaných slitin hliníku. Druhou částí práce je návrh varianty řešení, ve které jsou podrobně rozebrány používané povrchové úpravy u forem pro tlakové lití a jejich specifické vlastnosti. V závěru této kapitoly jsou znázorněna teplotní pole formy. Další částí této práce jsou experimentální zkoušky, ve kterých probíhalo měření zvoleného povlaku s cílem zjištění jeho chování v průběhu licích cyklů se zaměřením na zvýšení životnosti vložky formy, snížení množství nalepovaného kovu na její stěny a zlepšení povrchu odlité součásti. Rozбором výsledků bylo zjištěno, že použitý povlak TiAlN přispěl ke snížení množství nalepovaného kovu na stěny formy, čímž došlo i ke snížení množství servisních intervalů, avšak při užití povlaku TiB₂ je dosahováno mnohem lepších výsledků. Experimentem bylo potvrzeno, že povlak TiAlN není vhodný pro užití do forem pro tlakové lití slitin hliníku.

Klíčová slova

PVD, PACVD, forma, životnost, tlakové lití, povlakování

ABSTRACT

Bachelor thesis is focused on the influence of surface treatments due to prolonging life and decreasing an amount of service hours on the die casting molds of aluminium alloys. Theoretical analysis of the problem deals with the requirements for tools materials used for making these moulds. Furthermore it deals with the materials which are most commonly used in their production and the species of aluminium alloys which are most commonly casted. The second part of this thesis, which is discussed in detail, deals with design solution regarding to usage of surface finishes on the moulds for die casting and their specific properties. Another part of this thesis contains experimental tests where was measured selected coating in order to determine its behaviour during the casting cycles with a focus on increasing lifetime of the mould insert, also reducing the amount of glued metal on the walls and finally improving the surface of casted part. It was found, according the analysis results, that the TiAlN coating helped to reduce the amount of glued metal on the mould walls. This also helped to reduce the amount of service intervals. On the other side for achieving much better results is better to use TiB₂ coating. It has been experimentally confirmed that the TiAlN coating is not suitable for using in die casting moulds of aluminium alloys

Key words

PVD, PACVD, mould, lifetime, casting dies, coating

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ČERNÝ, Š. *Moderní povrchové úpravy tlakových forem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 77 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Moderní povrchové úpravy tlakových forem** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Štěpán Černý

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu prof. Ing. Miroslavovi Píškovi, Csc. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval panu Ing. M. Pavlasovi a pracovnímu kolektivu ve firmě Kovolis Hedvikov, a.s.

OBSAH

| | |
|--|----|
| ABSTRAKT | 3 |
| PROHLÁŠENÍ | 5 |
| PODĚKOVÁNÍ..... | 6 |
| OBSAH..... | 7 |
| ÚVOD | 9 |
| 1 TEORETICKÝ ROZBOR PROBLÉMU..... | 10 |
| 1.1 Obecně o lití do trvalých forem..... | 10 |
| 1.1.1. Trvalá forma..... | 10 |
| 1.1.2. Tlakové lití..... | 10 |
| 1.1.2.1. Rozdělení dle konstrukce..... | 13 |
| 1.1.3. Nízkotlaké lití..... | 14 |
| 1.2 Požadované vlastnosti materiálů použitých při výrobě trvalých forem..... | 15 |
| 1.2.1. Obrobitelnost..... | 15 |
| 1.2.2. Svařitelnost | 17 |
| 1.2.3. Rozměrová stálost | 20 |
| 1.2.3.1. Napětí při obrábění | 20 |
| 1.2.3.2. Tepelná napětí | 21 |
| 1.2.3.3. Přeměna napětí..... | 21 |
| 1.2.4. Možnost tepelného zpracování | 22 |
| 1.2.5. Odolnost proti korozi a erozi | 22 |
| 1.2.5.1. Koroze..... | 22 |
| 1.2.5.2. Eroze..... | 23 |
| 1.2.6. Možnost zhotovení povrchové úpravy..... | 24 |
| 1.2.7. Tepelná únava materiálu..... | 24 |
| 1.3 Druhy používaných materiálů při výrobě forem pro tlakové lití | 25 |
| 1.3.1. Ocel 1.2343 (19552, X38CrMoV5-1)..... | 25 |
| 1.3.2. Ocel DIEVAR (označení výrobce Uddeholm)..... | 27 |
| 1.3.3. Ocel TQ1 (označení výrobce) | 31 |
| 1.4 Nejčastěji používané druhy odlévaných materiálů..... | 32 |
| 1.4.1. AlSi9Cu3..... | 32 |
| 1.4.2. AlSi12..... | 34 |

| | | |
|----------|---|----|
| 2 | NAVRŽENÉ VARIANTY ŘEŠENÍ..... | 36 |
| 2.1 | PVD povlakování..... | 36 |
| 2.1.1. | Charakteristika | 36 |
| 2.1.2. | Příprava povrchu před povlakováním..... | 37 |
| 2.1.3. | Proces povlakování..... | 39 |
| 2.1.3.1. | Naprašování..... | 39 |
| 2.1.3.2. | Napařování..... | 41 |
| 2.1.4. | Vlastnosti PVD povlaků..... | 45 |
| 2.1.4.1. | Adheze | 45 |
| 2.1.4.2. | Tvrdost | 45 |
| 2.1.4.3. | Drsnost..... | 45 |
| 2.1.4.4. | Tloušťka | 45 |
| 2.1.4.5. | Kluzné vlastnosti | 45 |
| 2.1.4.6. | Odolnost vůči oxidaci | 46 |
| 2.1.4.7. | Chemická stabilita | 46 |
| 2.1.4.8. | Tepelná stabilita | 46 |
| 2.1.5. | Druhy PVD povlaků používaných ve formách pro tlakové lití | 46 |
| 2.2 | PACVD povlakování (Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition)..... | 48 |
| 2.2.1. | Charakteristika | 48 |
| 2.2.2. | Příprava povrchu před povlakováním..... | 48 |
| 2.2.3. | Proces povlakování..... | 48 |
| 2.2.4. | Druhy povlaků používaných ve formách pro tlakové lití | 49 |
| 2.3 | Nitridace | 50 |
| 2.4 | Průběh teplotních polí | 51 |
| 2.5 | Druhy použitých povlaků v našem experimentu | 55 |
| 2.5.1. | Základní údaje k experimentu | 55 |
| 3 | EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠKY..... | 56 |
| 3.1 | Experiment | 56 |
| 3.1.1. | Stav povrchu vložky po 4 150 cyklech | 56 |
| 3.1.2. | Stav povrchu vložky po 10 050 cyklech | 57 |
| 3.1.3. | Porovnání s jiným typem povlaku | 66 |
| 4 | DISKUZE VÝSLEDKŮ | 68 |
| 4.1 | Získané výsledky z experimentu | 68 |
| | ZÁVĚR | 69 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ | 70 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK | 77 |

ÚVOD

Tlakové lití je v současné době velmi dobře se rozvíjejícím odvětvím strojírenské výroby. Je jím možné za relativně krátký čas zhotovovat velmi složité a přesné odlitky. V současné době největší množství tlakově odlévaných odlitků míří do automobilového průmyslu, kde je snaha o co největší snížení hmotnosti automobilů a tím snížení spotřeby pohonných hmot.

Výroba čím dál složitějších výrobků má za následek zvyšování nároků na lící zařízení a s tím spojenou životnost lících forem. Dochází ke snaze o co největší prodloužení jejich životnosti a snížení provozních nároků během životnosti formy.

Cílem této bakalářské práce je zhodnocení přínosu povrchových úprav funkčních částí lících forem na jejich životnost.

1 TEORETICKÝ ROZBOR PROBLÉMU

1.1 Obecně o lití do trvalých forem

1.1.1. Trvalá forma

Pojem trvalá forma představuje takový druh formy, který umožňuje opakované lití od stovek až do několika stovek tisíc kusů odlitků. Záleží na druhu odlévaného kovu a také na použitých materiálech pro výrobu formy a v neposlední řadě na správně zvoleném způsobu chlazení formy, které je často velmi opomíjené, ale pro trvanlivost formy a kvalitu povrchu výsledného odlitku má velký význam [1, 2].

Odlévání do trvalých forem se dělí do několika kategorií a to dle způsobů lití. Nejčastější způsoby odlévání jsou podrobněji uvedeny v následující kapitole.

V dnešní době rozeznáváme dva základní druhy trvalých forem a to buď zhotovenými z kovu anebo grafitu. Formy zhotovené z kovu jsou v dnešní době běžnější. Použití grafitových forem v současné době nejvíce brání potíže při jejich výrobě a také menší zkušenosti s jejich výrobou. Ovšem při zhotovování velmi složitých odlitků je možné použít kombinovanou formu, kdy vnější tvar je zhotoven za pomoci kovové formy a vnitřní tvar pomocí pískových nebo solných jader. Solná jádra jsou v současné době velkou novinkou v oboru tlakového lití. Výroba těchto jader je založena na podobném způsobu, jako je tlakové lití slitin hliníku. Po zatuhnutí jsou solná jádra vkládána do dutiny formy a jejich pomocí je možné vyrábět typy odlitků, které jsou jinak nevyrobitelné klasickým způsobem lití do trvalých forem [2, 3, 4].

Hlavní výhody [4]:

- nárůst produkce slévárny 1,5÷6krát
- snížení nákladů o 15÷20%
- zvýšení využití vsázky 8÷22%
- odpadá příprava formovací

1.1.2. Tlakové lití

Tlakové lití kovů do trvalých forem zažívá v posledních letech velký nárůst popularity a to hlavně díky automobilovému průmyslu. Nabízí ekonomický způsob výroby velkého množství velmi přesných a tvarově složitých odlitků o tloušťce stěn od 1÷2 mm. Nejčastěji odlévanými materiály jsou slitiny hliníku, mědi, zinku a v neposlední řadě také mosazi. Do ekonomiky celého výrobního procesu se promítají stále se stupňující požadavky na lící zařízení, přičemž největší procento nákladů připadá právě na výrobu forem. Snahou tedy je o co největší prodloužení životnosti forem za snížení množství nutných oprav a tím i zvýšení ekonomičnosti celého výrobního procesu. S cílem prodloužení životnosti lících forem se stále častěji v současné době využívají různé druhy povrchových úprav [6, 7].

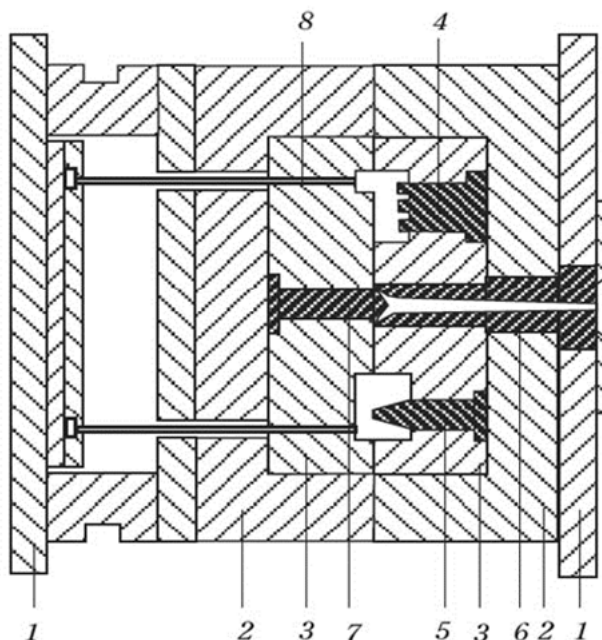
Princip této metody je založen na vstřikování roztaveného kovu (slitiny) do dutiny kovové formy. Vše se děje pod vysokým tlakem, který dosahuje až 250 MPa. Při návrhu formy je velice důležité správné umístění dělící roviny, aby bylo možné po odlití vyjmout odlitek z dutiny formy, aniž by došlo k jeho poškození, anebo v horším případě k destrukci samotné formy. Jádra forem jsou zhotovována

výhradně z kovu. Nejčastěji užívané materiály pro výrobu forem se budeme blíže zabývat v další kapitole této práce. Z důvodu porezity, která je přítomná v odlitcích, je zapotřebí většinu děr předlévat. U forem, kde není možné z konstrukčních důvodů zhotovit na odlitku předlévaný otvor pomocí jader z důvodu jeho následného vyjmutí z formy se využívají kovové zálitky [6, 8].

Hmotnost odlitků a jejich velikost je závislá od velikosti uzavírací síly stroje (lisu). Z tohoto údaje můžeme vyčíst velikost síly, kterou jsou k sobě obě poloviny formy stlačovány, přičemž velké stroje dosahují hodnot až 44 000 kN [5, 7].



Obr. 1.1. Vstřikovací stroj BÜHLER GARAN s uzavírací silou a 44000 kN [9]



- 1 Pevná část nástroje
- 2 Pohyblivá část nástroje
- 3 Vložka
- 4 Vložka do nástroje
- 5 Jádra
- 6 Dopadová část vtoku
- 7 Nástavec komory
- 8 Vyhazovače

Obr. 1.2. Skladba formy [5]

U odlitků zhotovovaných tlakovým litím je velký problém vnitřní homogenita, protože při vnikání kovu do formy dochází ke vzniku turbulencí kovu a tím k jeho oxidaci. Další problémem je také reakce kovu s mazadlem, důsledkem čehož je vnik vměstků. Všem těmto aspektům je možné předejít správnou konstrukcí vtokového a odvzdušňovacího systému a v neposlední řadě způsobu plnění. Možnost jak předejít výše uvedeným vadám je za pomoci simulací v některém software, které jsou v současné době dostupné na trhu [6, 10, 11].

Poměrně novou metodou je vakuové tlakové lití, kdy ve formě je vyrobeno vakuum za pomoci vakuové jednotky. Celá forma tak musí být velmi dobře utěsněna. Tato metoda je označována též někdy jako Vacural. Výsledné odlitky vykazují lepší mechanické vlastnosti než odlitky lité metodou tlakového lití. Další novou metodou je také squeeze casting. Jedná se vtlačování speciálního pístu do ještě nezatuhlého kovu. Jednou z dalších a velmi moderních metod je Thixocasting, přičemž tato metoda svým charakterem v sobě kombinuje odlévání a lisování [8, 11, 12, 13].

K prodloužení životnosti formy a výsledné kvalitě odlitků přispívá také udržování správné teploty formy. Vše je prováděno za pomoci chladících kanálků, které jsou součástí formy, přičemž formu je možné chladit také pomocí bodového chlazení. Před zahájením samotného lití je velmi důležité předejít formě, aby se zmenšil teplotní šok povrchu materiálů použitých ve formě a tím se zamezilo jejich poškození vlivem vzniku mikrotrhlin. Teplota a doba přehřevu je stanovena dle druhu formy a vhodné technologie přičemž se nejčastěji volí v rozmezí mezi 180÷250 °C. Na dutinu formy je před dalším licím cyklem nanášena separační vrstva buď ručně, anebo pomocí trysek, které jsou umístěny na licím stroji. S nanášenou vrstvou dochází také k prudkému ochlazení povrchu formy a tím i k teplotnímu šoku materiálu. Každá tryska je nastavena dle potřeby tak, aby docházelo k co nejefektivnějšímu chlazení a mazání. Množství mazacího media je voleno taktéž dle technologických požadavků a zkušeností [8, 14, 15].

V současné době se tlakové lití převážně využívá u lití širokého spektra slitin Al-i-Cu, Al-Si a Al-Mg, přičemž licí teploty bývají v rozmezí 610÷650°C. Navýšením obsahu Fe ve slitině na 1 % a více dochází ke snížení adhezního přilnutí odlévaného kovu na stěny formy. V tavící peci dochází k roztavení odlévaného kovu, který je dále dopravován do dávkovacích nebo udržovacích pecí, které jsou umístěny u licích strojů. V těchto pecích je poté obsluhou provedena rafinace a odplynění. Výjimečně také dochází k přefiltrování roztaveného kovu. Po určitém časovém intervalu bývá v udržovacích pecích prováděna rafinace a stažení strusky z hladiny. K větším metalurgickým zásahům v těchto pecích již většinou jinak nedochází. Modifikace ve většině případech není potřebná, protože dochází k rychlému chladnutí a v kovu se tak křemík vylučuje ve velikosti jemných částic [6, 8, 10].

Odlévaný kov je do plnicí trubice dopravován manuálně, nebo automaticky, přičemž toto dávkování je možné provádět pneumaticky nebo plnicí lžící přímo z dávkovací nebo udržovací pece. Jedna z těchto dvou pecí bývá standardně součástí pracoviště [10, 12].

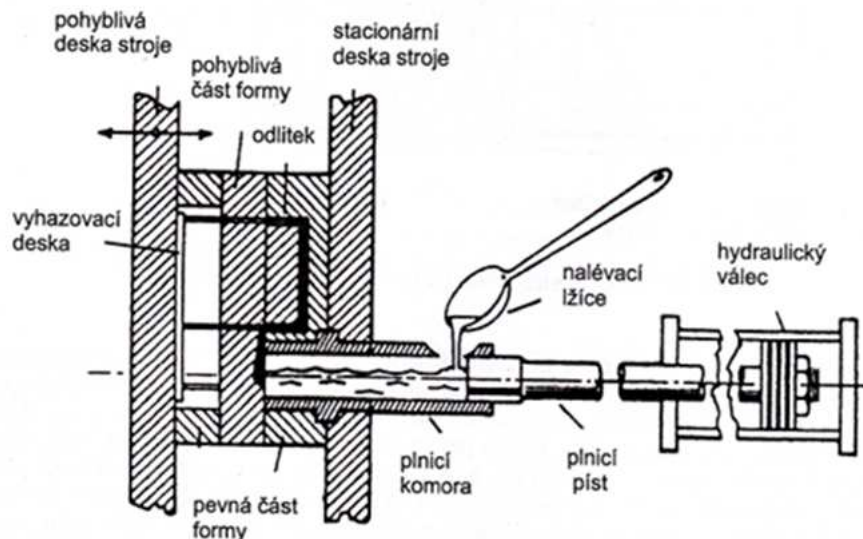
Odlitek je z formy vytlačován pomocí vyhazovačů, které jsou součástí formy a dále odebírán ručně, anebo automaticky za pomoci robota. Po vyjmutí z formy následuje ochlazení odlitku a odstranění vtoků a přetoků. Jako poslední operace před obráběním je ruční nebo strojová apretace [6, 10].

1.1.2.1. Rozdělení dle konstrukce

Stroje se studenou licí komorou

Stroje se studenou licí komorou se dále dělí na stroje s vertikální a horizontální licí komorou. Historie licích strojů s vertikální licí komorou sahá do roku 1927, kdy pražský inženýr Josef Polák si nechal tento typ stroje patentovat hned v několika zemích světa. Jednalo se o stroj, který měl oddělenou tavící pec a tekutý kov se vléval do tlakové komory a za pomoci pístu byla poté dopravena do formy. V současné době se stroje s vertikální licí komorou již téměř nepoužívají a ve většině případů je nahradily stroje s horizontální licí komorou, které vykazují větší produktivitu práce za snížených provozních nákladů a disponují také větší spolehlivostí. Tyto stroje v posledních letech zaznamenávají velký pokrok [12, 16, 17].

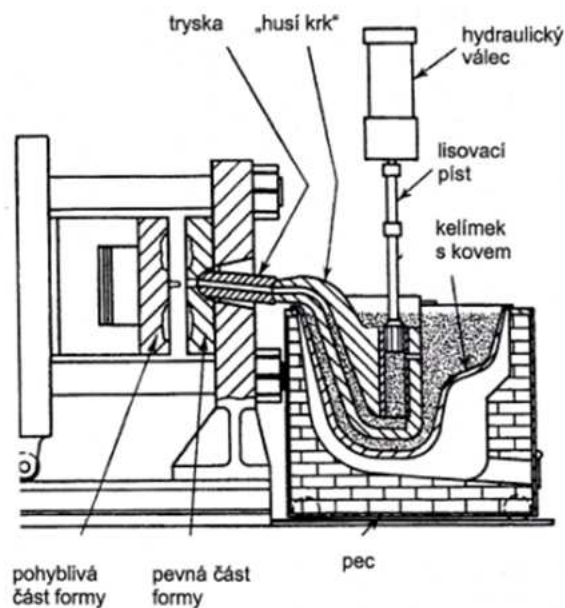
Stroje se studenou licí komorou jsou v současné době nejvíce využívány na výrobu odlitků z Al slitin [10, 16].



Obr. 1.3. Horizontální tlakový stroj se studenou komorou [10]

Stroje s teplou licí komorou

Plnicí komora je u těchto strojů umístěna pod hladinou kovu v udržovací peci. Největší výhoda u této metody spočívá v tom, že nedochází k přelévání kovu do plnicí komory a tak nedochází k jeho oxidaci. Tento způsob nalezl hlavní uplatnění hlavně u lití slitin hořčíku a zinku, naopak u lití slitin hliníku se nepoužívá [12, 18].



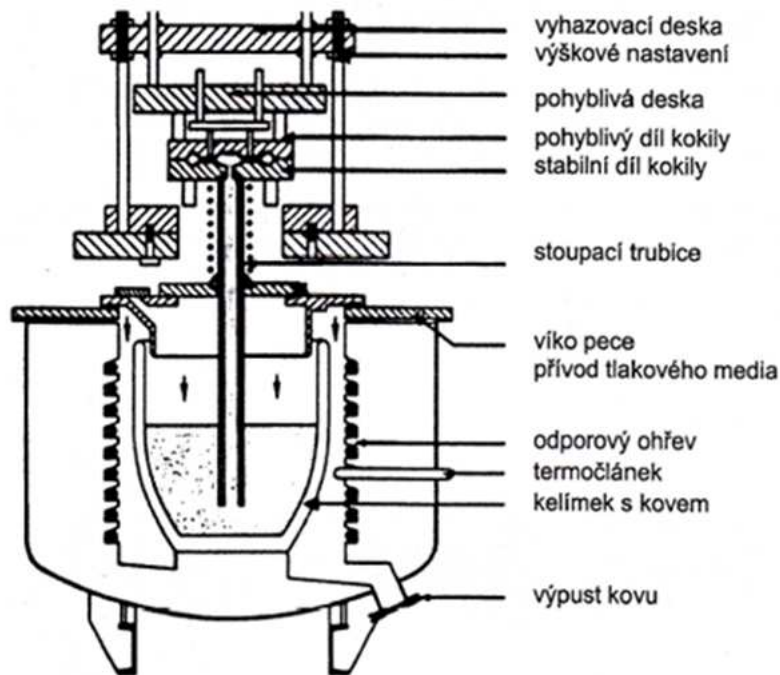
Obr. 1.4. Tlakový stroj s teplou komorou [10]

1.1.3. Nízkotlaké lití

Tato metoda odlévání je velmi výhodná z důvodu využití odlévaného kovu, které při správném načasování operací, teplotního režimu a vhodné konstrukce formy dosahuje až 90%. Výsledný odlitek vykazuje vynikající těsnost, minimum vměstků a plynových dutin na rozdíl od tlakových medií. Důsledkem toho, že kov nepříjde prakticky do styku s okolní atmosférou a proudění kovu je velmi klidné, tak nedochází k oxidaci taveniny. Tímto způsobem lití dostáváme velmi kvalitní odlitky [12, 19].

Forma je upnuta nad tlakotěsnou udržovací pecí, přičemž forma má nejčastěji vodorovnou dělicí rovinu. Propojení formy s pecí zajišťuje žáruvzdorná trubice, která spodním okrajem zasahuje pod hladinu roztaveného kovu. K samotnému procesu lití dochází tak, že je v peci vytvořen přetlak plynů nad hladinou kovu a tím dochází ke stoupání roztaveného kovu do formy. Díky tomu, že je konec žáruvzdorné trubice ponořen pod vrstvu nečistot a oxidů, tak do formy vstupuje pouze čistý kov bez vměstků. Rychlost plnění formy je možné regulovat nárůstem tlaku. Tento přetlak je udržován po celou dobu tuhnutí kovu ve formě a díky němu se do formy doplňuje kov, přičemž vtok současně působí jako nálitek. Po zatuhnutí kovu dojde ke zrušení přetlaku a roztavený kov, který je v žáruvzdorné trubici začne samovolně klesat do udržovací pece. Po ukončení celého procesu dojde k otevření formy a pomocí vyhazovačů je odlitek vytlačen z pohyblivé části formy [12, 19].

Výhodou nízkotlakého lití je různorodost hmotnosti vyráběných odlitků, ovšem nevýhodou při odlévání silnostěnných odlitků je prodlužování výrobního cyklu. Velikost kelímku je nutné vhodně dimenzovat vůči velikosti odlévané součásti, aby nedocházelo k příliš častému plnění kovem z tavicí pece [10, 12].



Obr. 1.5. Schéma stroje pro nízkotlaké lití [10]

Dalším typem nízkotlakého lití je metoda lití s protitlakem, kdy na začátku pracovního cyklu je nejen v udržovací peci, ale i ve formě vytvořen přetlak a snižováním tohoto přetlaku ve formě dochází k jejímu postupnému zaplňování. U tohoto způsobu je celkově udržován vyšší tlak než při samotném nízkotlakém lití a díky tomu dochází k rychlejšímu odvodu tepla do formy z roztaveného kovu. Následkem toho je snížení množství plynových bublin a ředin ve výsledném odlitku. Využití této metody je především pro odlitky s vyšší tloušťkou stěny [10, 12].

1.2 Požadované vlastnosti materiálů použitých při výrobě trvalých forem

- Dobrá obrobiteľnosť a to i elektroerozívním obráběním,
- svařitelnost z důvodu jejich případné opravy,
- rozměrová stálost,
- možnost tepelného zpracování,
- odolnost proti korozi a erozi,
- odolnost proti vzniku trhlin a lomu,
- možnost zhotovení povrchové úpravy.

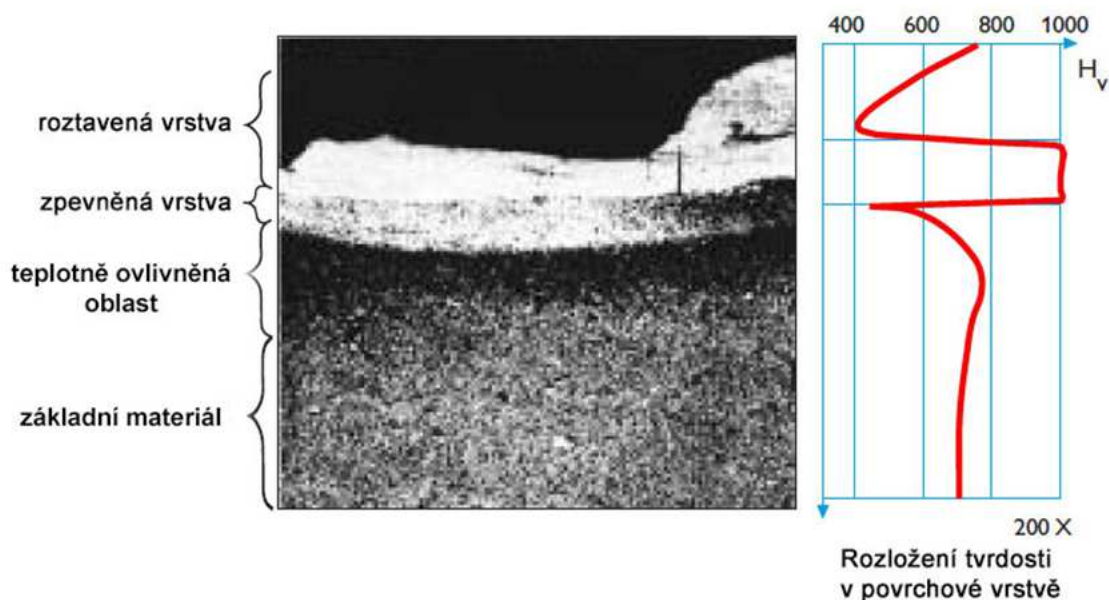
1.2.1. Obrobiteľnosť

Obrobiteľnosť je brána jako jedna z nejdůležitějších vlastností materiálu a je ovlivněna několika faktory (druh a tepelné zpracování obráběného materiálu, jeho

mikrostruktura a chemické složení, řezné podmínky, nástroje a jejich upnutí, řezným procesem, strojním vybavením, fyzikální a mechanické vlastnosti obráběného materiálu a způsobem jeho upnutí, způsobem chlazení). Je to schopnost materiálu být přetvářen. Obrobitelnost je možné považovat za dobrou v případě splnění alespoň jednoho z následujících kritérií: co nejnižší energetické náklady, minimální opotřebení nástroje a řezné síly, vhodná kvalita povrchu u obráběné plochy, snížením problémů s odvodem třísek a jejich utváření. Tento pojem tedy většinou představuje co nejhospodárnější výrobu při daných technologických podmínkách. Na základě obrobitelnosti daného materiálu jsou voleny řezné podmínky [20, 21].

Elektroerozivní obrábění (EDM) je v současné době velmi často používanou metodou při výrobě forem. Zařazením této metody do výrobního procesu došlo k velmi výraznému zlepšení povrchu u obráběných materiálů a tím i zlepšení provozních podmínek, přesnosti a v neposlední řadě též produktivity [22, 23].

Při elektroerozivním obrábění vznikají elektrické výboje mezi grafitovou, popřípadě měděnou anodou a obráběnou ocelí, která je zapojena jako katoda. Celý proces probíhá v dielektrickém prostředí. Povrch oceli je v průběhu pracovního procesu vystaven velmi vysokým teplotám, které způsobují vypařování nebo tavení obráběného materiálu. Dojde ke vzniku roztavené a nestálé vrstvy, která způsobí, že se na povrchu materiálu vytvoří tvrdá kalená vrstva. Tímto může dojít na povrchu materiálu ke vzniku nežádoucího povrchového napětí, které může způsobit vznik trhlin a tím zkrácení životnosti vložek formy. Vzniku trhlin lze předcházet správným technologickým postupem, tj. zařazením tepelného zpracování oceli po obrábění [24, 25].



Obr. 1.6. Povrchové zpevnění při EDM [26]



Obr. 1.7. Trhlina povrchové vrstvy vzniklá v důsledku EDM [27]

1.2.2. Svařitelnost

Jedná se o komplexní charakteristiku materiálu, která nám říká, za jakých podmínek nám vznikne svarový spoj požadované jakosti bez dutin, trhlin a s dobrými mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi, které jsou podobné základnímu materiálu, aniž by muselo být použito zvláštních opatření. Takový materiál lze považovat za svařitelný [28, 29].

Vhodnost kovu ke svařování je podmíněna jeho metalurgickým způsobem výroby, tepelným zpracováním, chemickým složením a také způsobem tváření a lití [30, 31].

Při opravách forem pro talkové lití se nejvíce používá tavné svařování.

Tavná svařitelnost se dále dělí do čtyř podskupin [30]:

- a) zaručená
- b) podmíněně zaručená,
- c) dobrá
- d) obtížná

Tloušťka svařovaného materiálu a obsah uhlíku nejvíce ovlivňují svařitelnost u uhlíkových ocelí. Oceli, které obsahují okolo 0,2 až 0,25% uhlíku považujeme za dobře svařitelné. Oceli, které obsahují vyšší obsah uhlíku jak 0,5% se nedoporučuje svařovat. Oceli o tloušťce nad 25 mm se doporučují předehřívat. Slitinové oceli mají vliv prvků vyjádřený tak zvaným ekvivalentním obsahem uhlíku C_e . Oceli, které mají uhlíkový ekvivalent C_e nižší jak 0,5%, se považují za dobře svařitelné. Je uváděno, že obsah uhlíku musí být nižší než 0,3% [32, 33].

Výpočet uhlíkové ekvivalentu slitinových ocelí u tavného svařování [30] (1.1).

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{15} + \frac{Mo}{4} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2} + 0,0024 \cdot t \text{ [%]} \quad (1.1)$$

kde: C_e [%] - uhlíkový ekvivalent.

U svařitelnosti odporové je taktéž možné vyjádřit svařitelnost pomocí uhlíkové ekvivalentu C_e . Pro zvolení správného způsobu svařování je nutná znalost diagramů IRA.

Výpočet uhlíkové ekvivalentu slitinových ocelí u odporového svařování [30] (1.2).

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{15} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{4} \text{ [%]} \quad (1.2)$$

kde: C_e [%] - uhlíkový ekvivalent.

Před samotným započítáním svařování je velmi důležitá příprava svarového místa. Je nutné toto místo dokonale očistit do kovového lesku, srazit hrany, vylomeniny a případné trhliny, které jdou do hloubky, je nutno opracovat do tvaru U. Vše je nutné následně očistit a případně provést odmaštění. Je nezbytné provést předehřátí materiálu a to ne jen v závislosti na jeho chemickém složení, ale i tvaru, protože například při opravách malých hran je možné předehřátí o cca 100 °C nižší než uprostřed svařované součásti. U opravovaných, nebo velmi obtížně svařitelných materiálů je vhodné nejprve navařit mezivrstvu, aby bylo dosaženo homogenity povrchu. Používají se materiály nižší až střední tvrdosti a to i pro výplně větších tloušťek. Obalené elektrody musí být suché a přídavné materiály čisté. Při svařování oceli náchylné k praskání, je zapotřebí svařovat tak, abychom do oceli vnesli co nejméně tepla. To je prováděno tak, že se svařuje malým průměrem přídavného materiálu, bez kývání rovnými housenkami (tímto je zabráněno vzniku trhlin napětím po smrštění při velké lázni) a nízkým proudem. Je nutné často odstraňovat zbytky strusky. Při užití příliš vysokých teplot při navařování, může dojít ke snížení konečné tvrdosti, proto je nutné velké návary kontrolovat a případně provést jejich ochlazení. Pro spojovací svary, jakostnější návary a zaváření trhlin je vhodné používat trubičkové dráty pro svařování v ochranném plynu. Ty také produkují méně škodlivých látek, a proto jsou na rozdíl od typů s vlastní ochranou vhodnější pro práci v dílně. Typy s vlastní ochranou se používají zejména při práci ve venkovním prostředí, kde by mohlo docházet působením větru k nedostatečné ochraně svarového místa. Tento typ se používá zejména pro navařování [28, 33].

Nástrojové oceli se doporučuje svařovat s předehřevem dle geometrie nástroje, jeho velikosti a typu oceli. Je nutné udržovat stálou teplotu svařovaného materiálu, popřípadě jej průběžně dohřívát. Doporučuje se větší opravy provádět s vysokým předehřevem ve stavu měkce žíhaném. Tyto oceli jsou velmi citlivé na vznik vytvrzenin a trhlin. Po svařování je nezbytné pomalé ochlazení s případnou výdrží na teplotě ke snížení vnitřního pnutí, přičemž se doporučuje svarový spoj temovat, aby se snížilo zbytkové napětí. U vysokolegovaných nástrojových ocelí nesmí teplota temovaného spoje klesnout pod 350 °C! Uvádí se, že je nutné zařadit po svařování tepelné zpracování, pokud bylo na svařovaný materiál nanесeno větší množství svarového kovu [34, 35].

Nástrojové oceli pro práci za tepla je nutné předehtřívát dle jejich chemického složení, a to u ocelí MoCr minimálně na 400 °C a NiCrMo minimálně na 300 °C. Pokud dojde k většímu návaru, tak je vhodné provést popouštění při 550 °C [33, 35].

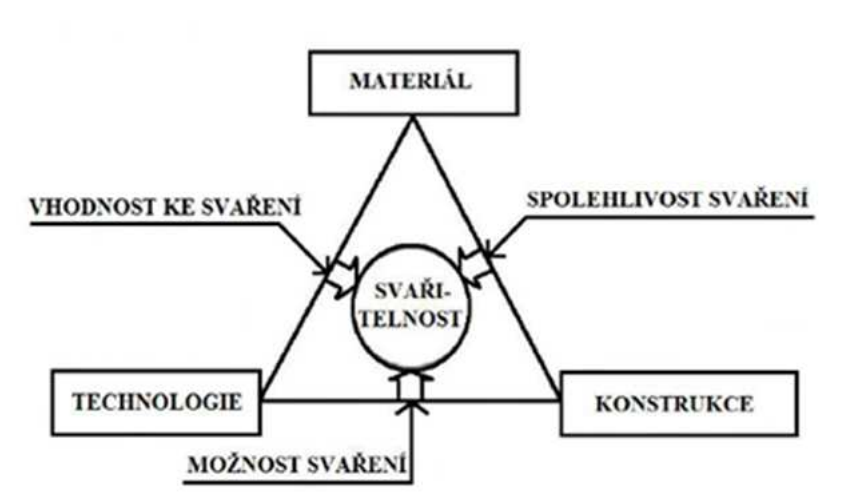
Pro materiály, které jsou používány na tlakové lití je vhodná vytvrditelná slitina, která je velmi odolná proti opotřebení. Používají se elektrody UTP 702, drát UTP A 702. Předehtřev se provádí na teplotu 150 °C a na této teplotě se udržuje. Tvrdost svarového kovu je cca 37 HRC. Po vytvrzení na teplotu 480 °C po dobu 3 až 4 hodiny je možné dosáhnout až 54 HRC. Je zapotřebí provádět minimálně 3 vrstvy. Tímto způsobem lze oproti stejnorodému návaru dosáhnout i výrazně vyšší životnosti [34, 35].

Tab. 1.1 Tabulka vlastností používaných elektrod pro navařování nástrojových ocelí [34]

| ELEKTRODY PRO NÁVARY NÁSTROJOVÝCH OCELÍ | | | |
|---|--|---|--|
| UTP 702 E 3-UM-350 T UTP 702 HL | 34-37 HRc po 3-4 h/480°C 50-54 HRc | C 0,025 Si 0,20 Mn 0,60 Ni 20,0 Co 12,0 Mo 4,00 Fe základ | Bazická elektroda pro návar nejvyšší jakosti zejména na složité nástroje pro práci za tepla. Dobře třískově obrobitelný návar po vytvrzení vysoce odolný opotřebení. Výborná pro formy na plasty, formy na lití hliníku, dále pro lisovací nástroje, nůžky na silné materiály, nástroje pro tažení, ražení, ohraňování, stříhání za tepla, kování. Vhodná i pro práci za studena, např. zápustky. Připojení = +. Pro produktivní návar v poloze vodorovné dodáváme UTP 702 HL s vysokou výtěžností. Dodáván ø2,5-3,2-4,0 |
| UTP 750 E3-UM-50-CTZ | 48-52 HRc cca 35 HRc po žíhání 850-900°C 48-52 HRc kalení vzduch 1000°C 40 HRc popouštění 700°C | C 0,20 Si 0,50 Mn 0,20 Cr 11,5 Ni 1,00 Mo 4,50 Co 12,5 Fe základ | Rutilová elektroda pro návar nástrojů pracujících za tepla ve vodorovné poloze. Nerezavějící návar se zvýšenou odolností proti popouštění do 650°C, odolnost opalu do 900°C. Zejména proti opotřebení kov-kov při vyšších teplotách a změnách teplot. Nástroje pro tlakové lití hliníku, mosazi, hořčíku, protlačovací trny, ostříhovačla, vodící a třecí plochy, zápustky atd. Návar lze nitridovat. Připojení = + / ~ Dodáván ø2,5-3,2-4,0 |

Tab. 1.2 Tabulka vlastností používaných typů drátů pro navařování nástrojových ocelí [34]

| DRÁTY MAG/WIG PRO NÁVARY NÁSTROJOVÝCH OCELÍ | | | |
|--|---|--|---|
| UTP A 702 SG3-GZ-350 T | návar 32-35 HRc 50-54 HRc po vytvrzení 3-4 h/480°C | C 0,02 Si 0,20 Mn 0,60 Ni 18,0 Co 12,0 Mo 4,00 Ti 1,60 Al 0,10 Fe základ | MAG a WIG drát pro návar nejvyšší jakosti zejména na složitější nástroje pracující za tepla, ale i za studena. Opravy opotřebení i nová výroba návarem na méně jakostní nosič. Návar dobře třískově obrobitelný, po vytvrzení vysoká odolnost opotřebení. Výborná slitina pro formy na plasty a formy na hliník. Dále pro lisovací nástroje, nůžky pro silné materiály, nástroje pro tažení, ražení, ohraňování, stříhání za tepla, kování. Ochranný plyn pro Ar pro MIG i WIG, při MIG doporučen pulsní oblouk. Dodáván ø 1,6-2,0-2,4 tyčky, ø 1,0-1,2 na cívce. |



Obr. 1.8. Vlivy působící na svařitelnost [36]

1.2.3. Rozměrová stálost

Během tepelného zpracování a v průběhu pracovního cyklu formy dochází k deformacím, které jsou závislé na teplotě daného materiálu. Čím vyšší je teplota, tím je také větší procento výskytu deformací. Toto je dobře známé a je možno tomu předcházet vhodnou volbou tolerancí na obrábění. Ke vzniku deformací dochází na základě napětí, která jsou přítomná v materiálu, přičemž rozlišujeme základní tři typy napětí, a to napětí vzniklé při obrábění, tepelné napětí a přeměny napětí [5, 37].

1.2.3.1. Napětí při obrábění

Tato zbytková napětí vznikají v materiálu důsledkem obrábění, mezi které patří například soustružení, broušení, frézování, atd. Je možné tato napětí definovat jako napětí vzniklá v materiálu bez vnějšího zatížení. Před obráběním ocelí se doporučuje zařadit žihání na měkko [38, 39].

Při určování jednotlivých vlivů technologických procesů na vlastnosti povrchové vrstvy obráběné součásti v průběhu její výroby je zapotřebí vycházet z intenzity a druhu energií, které se mohou na jeho vzniku podílet. Zejména se jedná o energii tepelnou, mechanickou a chemickou, přičemž je nezbytné uvažovat též s vlivy fyzikálními, metalurgickými, ale také materiálovými vlastnostmi [40, 41].

Mezi hlavní příčiny vzniku zbytkových napětí patří [40]:

- nerovnoměrné ochlazování a ohřívání materiálu, která způsobují jeho roztažení a smršťování,
- vlivem mechanických sil a působením tepla způsobené změny struktury,
- nerovnoměrně rozložená plastická deformace v obrobeném povrchu,
- chemické procesy, které jsou spojené s reakcí části pronikajících do povrchových vrstev.

Největší význam se přiřazuje povrchovým napětím, která mohou být prospěšná nebo i škodlivá. Tlaková napětí velmi pozitivně ovlivňují únavové vlastnosti materiálu a tím snižují riziko vzniku a rozvoje povrchových trhlin. Naopak tahová napětí mají spíše negativní vliv. Zbytková napětí a s nimi spojené relaxační procesy mohou dosahovat vysokých hodnot a tím ovlivňovat pevnostní charakteristiky materiálu a mohou negativně ovlivňovat kvalitu povrchu a způsobovat nestabilitu tvaru součásti. U moderních technologií, jakou je například vysokorychlostní tvrdé frézování (HSC) je tento problém celkem významný. Dochází totiž u nich k extrémním záběrovým podmínkám a to jak s tepelného hlediska, tak i z hlediska mechanického [42, 43].

1.2.3.2. Tepelná napětí

Tato napětí jsou u forem především způsobena ohřevem formy v průběhu jednotlivých cyklů, kdy dochází k velmi prudkým a nerovnoměrným změnám teplot a tím spojené lokální změně objemu formy. Toto vše zapříčiňuje vznik deformací a napětí. Proto je v praxi snaha o co nejrovnoměrnější ohřátí celé formy. Při ochlazování formy můžeme nalézt mnoho podobností s ohřevem formy. Ochlazení formy může být jen tak rychle, jakou míru deformací jsme schopni akceptovat, přičemž je snaha o co nejrovnoměrnější ochlazování, abychom předešli rozdílným teplotám ploch formy. Nejvíce je toto patrné u složitých a velkých forem [5, 43, 44].

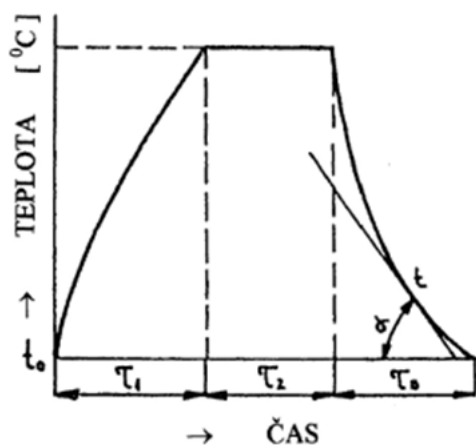
1.2.3.3. Přeměna napětí

Ke vzniku tohoto napětí dochází změnou mikrostruktury oceli. Mezi nejvíce patrné změny patří změna objemu zapříčiněná přeměnou austenitu na martenzit [5, 45].

1.2.4. Možnost tepelného zpracování

Možností tepelného zpracování oceli rozumíme záměrné využití strukturních a fázových přeměn v tuhém stavu, aby došlo ke změně struktury a tím také k získání námi požadovaných strukturních a mechanických vlastností vyráběné součásti [46].

Oceli používané pro práci za tepla jsou standardně dodávány ve stavu žíhaném na měkko. Při ohřátí oceli do oblasti austenitizačních teplot jsou její vlastnosti podmíněny velikostí zrna a také chemickým složením. Ze zvyšující se teplotou a dobou ohřevu dochází k hrubnutí zrna a nárůstu homogenity austenitu, přičemž druhou změnu vlastností můžeme považovat s ohledem na další zpracování oceli za příznivou, ale hrubnutí austenitického zrna má za následek snížení výsledné houževnatosti a pevnosti materiálu. Vyšší austenitizační teploty se z tohoto důvodu používají pouze pro vodící čepy jader, jádra anebo malé formy. Materiál při vyšších pevnostech má sklon ke vzniku tepelných trhlin. Z tohoto důvodu se u materiálů používaných ve formách pro tlakové lití hliníku nedoporučuje vyšší pevnost než 50 HRC a u materiálů pro lití mosazi vyšší než 45 HRC [5, 26, 47].



Obr. 1.9. Obecný diagram tepelného zpracování [46]

1.2.5. Odolnost proti korozi a erozi

1.2.5.1. Koroze

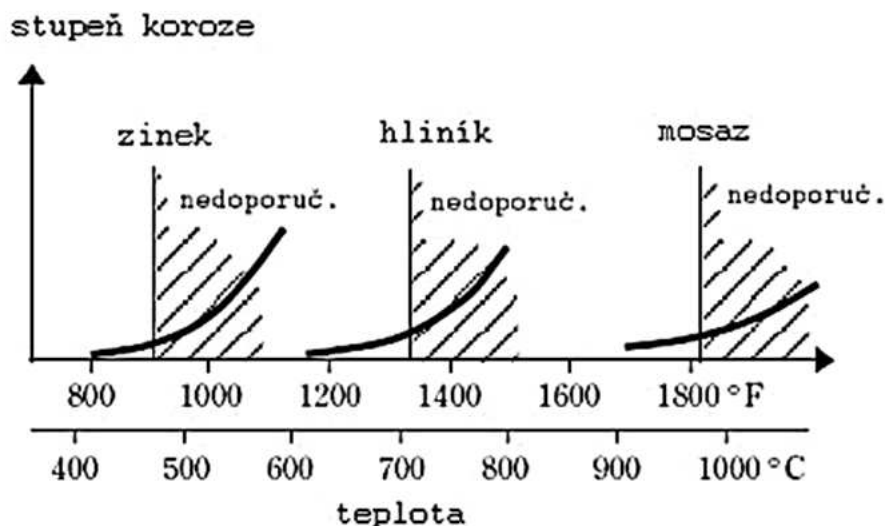
V průběhu pracovních cyklů dochází mezi povrchem formy a odlévaným kovem k vzájemné difundaci prvků. Korozi velmi významně ovlivňují následující faktory [48]:

- teplota a složení odlévaného materiálu,
- provedení formy,
- povrchová úprava formy.

Teplota a složení odlévaného materiálu

Po překročení kritické teploty odlévané slitiny dochází ke zvýšení možnosti výskytu koroze. Při teplotách okolo 720 °C dochází k reakci mezi hliníkem a ocelí, ovšem k reakci mezi zinkem a ocelí dochází za podstatně nižších teplot cca 480 °C [26, 48].

Složení odlévaného kovu také velkou měrou přispívá ke vzniku koroze. Je dokázáno, že při odlévání čistého kovu je pravděpodobnost výskytu koroze daleko větší než při odlévání slitiny. V případě, že odlévaná slitina v sobě obsahuje i jen malé procento železa se taktéž pravděpodobnost koroze zvyšuje [5, 26].



Obr. 1.10. Závislost koroze na teplotě [26].

Provedení formy

Špatné konstrukční provedení vtokové soustavy může zapříčinit vysokou rychlost proudění odlévaného kovu do formy, což může mít za následek spláchnutí naneseného lubrikantu z povrchu formy [11, 12, 27].

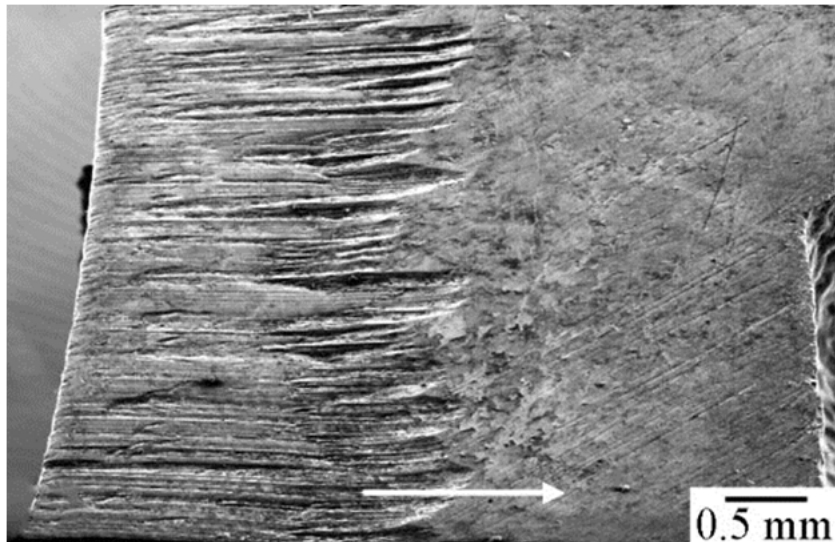
Pokud je špatně navržený způsob chlazení formy, dochází vlivem příliš vysokých teplot k odpaření nanášeného lubrikantu. Nízké teploty jsou také nežádoucí, protože nedojde k reakci mezi povrchem formy a lubrikantem [14, 27].

Povrchová úprava formy

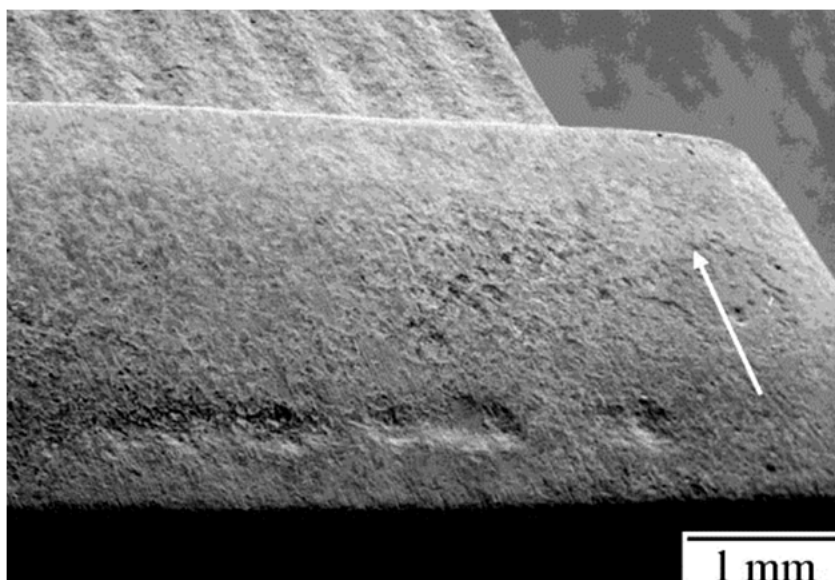
Volbou správné povrchové úpravy je zamezeno styku materiálu formy s roztaveným kovem, čímž je vznik koroze značně omezen [49, 50, 51].

1.2.5.2. Eroze

Jedná se o tepelně-mechanické opotřebení. Ke vzniku eroze největší měrou přispívá pohyb taveniny v průběhu licího cyklu, ale také rychlost a teplota proudícího kovu. Rychlost kapaliny by neměla překročit hodnotu 55 m/s. Opotřebení vzniklé v důsledku eroze je možné vidět na obrázcích 1.11 a 1.12. Směr proudění tekutého kovu je znázorněn šipkou [48, 52, 53].



Obr. 1.11. Opotřebení hran vlivem eroze [27].



Obr. 1.12. Opotřebení ploch vlivem eroze [27].

1.2.6. Možnost zhotovení povrchové úpravy

Velmi důležitou vlastností materiálů pro výrobu forem je jejich vhodnost k chemicko-tepelnému zpracování (nitridace,...) a nanášení povlaků PVD a PACVD [5, 26, 27].

1.2.7. Tepelná únava materiálu

Během procesu tlakového lití je materiál činných částí formy vystaven neustálému cyklickému teplotnímu namáhání (ohřev formy a následné prudké ochlazení). Tento jev má za následek vznik únavových lomů, které vedou postupně k destrukci činné části formy. Vznik tepelné únavy materiálu je možné podstatně ovlivnit průběhem teplotního cyklu během procesu lití (správný předehřev formy,

povrchová teplota formy, dosahované maximální teploty v průběhu lití a doba výdrže na těchto teplotách, rychlost ochlazení), vhodná volba materiálu (tepelný koeficient, tepelná vodivost, tepelná mez kluzu, mez tečení, tažnost) a v neposlední řadě správná konstrukce formy (velikost zaoblení a rádiusů, umístění děr, drsnost povrchu) [5, 26].



Obr. 1.13. Tepelná únava materiálu [27].

1.3 Druhy používaných materiálů při výrobě forem pro tlakové lití

1.3.1. Ocel 1.2343 (19552, X38CrMoV5-1)

Charakteristika

Jedná se o Cr-Mo-V legovanou ocel. Vykazuje velmi vysokou houževnatost a dobré pevnostní vlastnosti za tepla. Tato ocel má dobrou tepelnou vodivost s malou citlivostí na prudké změny teploty (možnost chlazení vodou). Má také dobrou odolnost vůči tvorbě trhlin. Projevuje se obzvláště dobrou kalitelností ve vakuu a na vzduchu. Při dodržení určitých podmínek lze ocel kalit do vody. Vykazuje velmi malé deformace po kalení [54, 55].

Použití

Jedná se o ocel používanou zejména pro práci za tepla, především pro zpracování slitin lehkých kovů, jako například jsou: lisovací třmeny, lisovací matrice, formy pro tlakové lití slitin hliníku, hořčíku a zinku, tvarové části forem, šneky pro zpracování umělých hmot, atd. [5, 54, 55].

Tepelné zpracování

Tab. 1.3 Tepelného zpracování oceli 1.2343 [5, 54].

| Druh tepelného zpracování | Teplota | Tvrdost | Prostředí |
|--------------------------------------|--------------|------------------|------------------------|
| Žihání na odstranění vnitřního pnutí | 600÷650 °C | | ochlazování v peci |
| Žihání na měkko | 750÷800 °C | maximálně 229 HB | ochlazování v peci |
| Kalení (prokalitelnost až 150 mm) | 1000÷1050 °C | minimálně 50 HRC | ochlazování v oleji |
| | 1000÷1050 °C | | Ochlazování na vzduchu |
| Popouštění | 550÷650 °C | 40÷55 HRC | |

Chemické složení

Tab. 1.4 Chemické složení oceli 1.2343 [55].

| Fe [%] | C [%] | Si [%] | Mn [%] | P _{max} [%] | S _{max} [%] | Cr [%] | Mo [%] | V [%] |
|-------------|-----------|---------|---------|----------------------|----------------------|---------|---------|----------|
| 90,42÷92,23 | 0,36÷0,42 | 0,9÷1,2 | 0,3÷0,5 | 0,03 | 0,03 | 4,8÷5,5 | 1,1÷1,4 | 0,25÷0,5 |

Vlastnosti

Tab. 1.5 Fyzikální vlastnosti [5].

| Hustota [kg·m ⁻³] | Měrná tepelná kapacita [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹] | Teplotní součinitel roztažnosti [K ⁻¹] | Tepelná vodivost [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹] | Konduktivita [mS·m ⁻¹] |
|----------------------------------|--|---|---|---------------------------------------|
| 7790 | - | 12,4·10 ⁻⁶ | ~29 | - |

Mechanické vlastnosti [54]:

- Zkušební polotovar zhotovený z válcované tyče za tepla o průměru 20 mm,
- kalený a popouštěný.

Tab. 1.6 Mechanické vlastnosti oceli 1.2343 [54].

| | Teplota | |
|------------------------------------|-----------------------|--------------|
| | 20 °C (při 40÷53 HRC) | 200÷600 °C |
| Mez kluzu R _{p0,2} | 1050÷1650 MPa | 1350÷660 MPa |
| Mez kluzu v tlaku | 1150÷1750 MPa | ~1600 MPa |
| Mez pevnosti v tahu R _m | 1220÷1880 MPa | 1520÷800 MPa |
| Vrbová houževnatost KCU | ~45÷88 kJ | 95÷90 kJ |
| Tažnost A ₅ | ~12÷15 % | 12÷18 % |
| Kontrakce Z | ~53÷59 % | 55÷78 % |
| Tvrdost | 40÷53 HRC | |

1.3.2. Ocel DIEVAR (označení výrobce Uddeholm)

Charakteristika

Jedná se o Cr-Mo-V legovanou vysoce výkonnou ocel určenou pro práci za tepla. Vyznačuje se vysokou odolností proti plastickým deformacím a opotřebením, odolností proti vzniku prasklin a trhlin vlivem tepelné únavy. Standardně je dodávána ve stavu žíhaném na měkko, cca 160 HB. Výroba je prováděna pomocí elektrostruskového přetavování a vakuování [56, 57].

Pro DIEVAR jsou charakteristické níže uvedené vlastnosti [56]:

- vysoká odolnost proti popouštění,
- vysoká pevnost za tepla,
- vynikající houževnatost a tažnost ve všech směrech,
- velmi dobrá kalitelnost,
- vysoká deformační stabilita při tepelném zpracování a povlakování.

Chemické složení

Tab. 1.7 Chemické složení oceli DIEVAR. [58]

| Fe [%] | C [%] | Si [%] | Mn [%] | Cr [%] | Mo [%] | V [%] |
|--------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 90,85 | 0,35 | 0,2 | 0,5 | 5,0 | 2,5 | 0,6 |

Použití

Tato ocel je speciálně vyvinuta pro práci za tepla, především pro výrobu vložek do forem pro tlakové lití slitin hliníku a hořčíku, matrice, pouzdra, lisovací podložky a trny na nástroje na protlačování a nástroje pro tváření oceli a slitin hliníku za tepla [58].

Tepelné zpracování

Žíhání ke snížení vnitřního pnutí

Toto žíhání je nezbytné provádět po hrubém opracování součásti. Ocel je nutné prohřát na teplotu 650 °C s následnou výdrží na této teplotě 2 hodiny. Po uplynutí tohoto času nechat volně ochladit v peci na teplotu 500 °C a z této teploty ochlazovat volně na vzduch [56, 57].

Žíhání na měkko

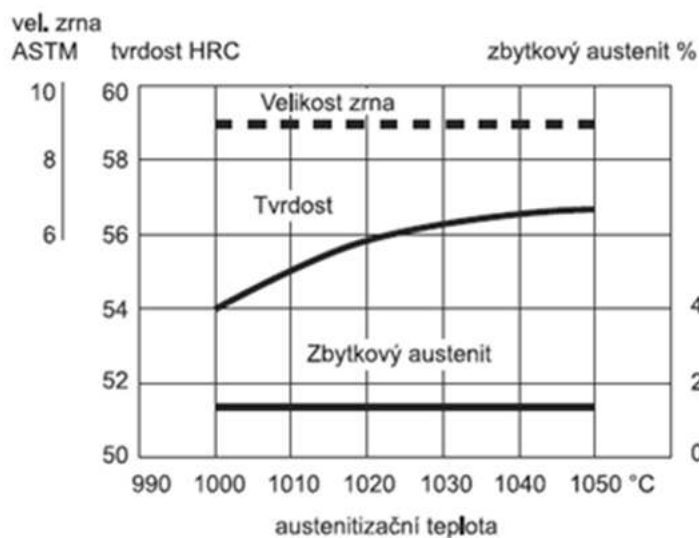
Ocel je nezbytné prohřát na teplotu 850 °C a poté ji pozvolna začít ochlazovat v peci rychlostí 10 °C za hodinu až do teploty 650 °C. Poté nechat volně ochladit na vzduchu [5, 56].

Kalení

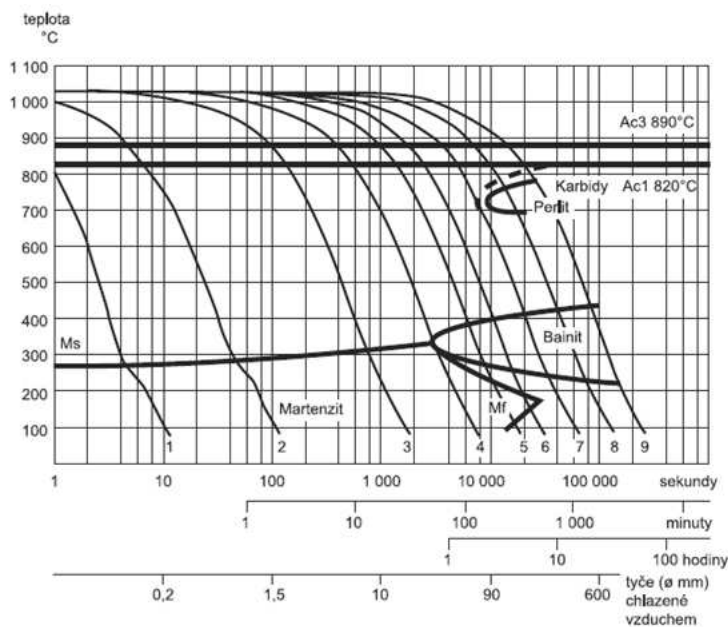
Předehřev je nutné rozdělit do dvou částí. První předehřev se provádí na teplotu 600÷650 °C a druhý na teplotu 820÷850 °C. Austenitizační teplota této oceli je 1000÷1030 °C [57, 58].

Tab. 1.8 Dosahované hodnoty tvrdosti v závislosti na teplotě [56].

| Teplota [°C] | Doba výdrže [min] | Tvrdost před popouštěním [HRC] |
|--------------|-------------------|--------------------------------|
| 1000 | 30 | 52±2 |
| 1025 | 30 | 55±2 |



Obr. 1.14. Tvrdost, velikost zrna a zbytkový austenit jako funkce austenitizační teploty [5]



| Ochlazovací křivka č. | tvrdost HV 10 | T ₈₀₀₋₅₀₀ (sec) |
|-----------------------|---------------|----------------------------|
| 1 | 681 | 1 |
| 2 | 627 | 15 |
| 3 | 620 | 280 |
| 4 | 592 | 1248 |
| 5 | 566 | 3205 |
| 6 | 488 | 5200 |
| 7 | 468 | 10400 |
| 8 | 464 | 20800 |
| 9 | 405 | 41600 |

Obr. 1.15. ARA diagram pro různé rychlosti ochlazování. Z austenitizační teploty 1025°C po dobu 30 minut [57].

Ochlazovací prostředí při kalení

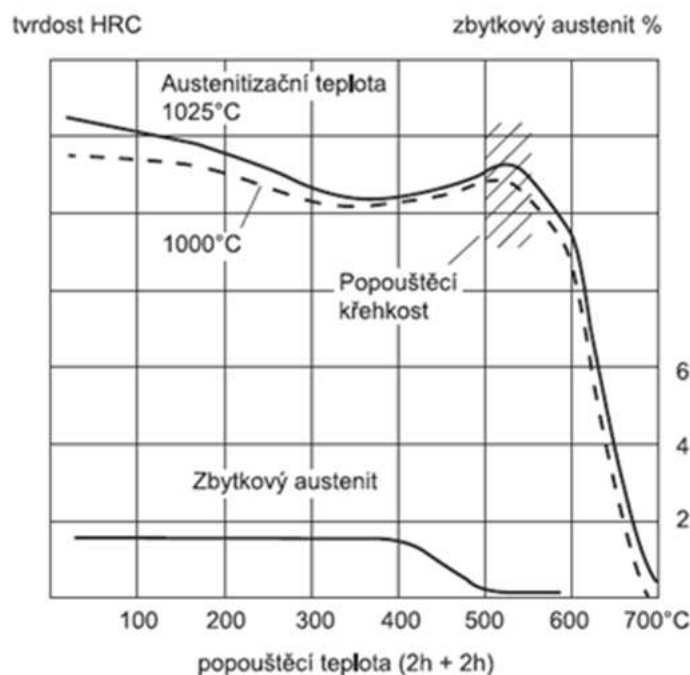
Dle všeobecných pravidel je doporučováno, aby ochlazování probíhalo tak rychle, jak je to jen možné. Zrychlené ochlazování se doporučuje pro optimalizaci vlastností nástroje, odolnosti proti opotřebení a především houževnatosti. Je ovšem nezbytné brát v úvahu možné riziko prasknutí a nadměrné deformace kalené součásti. Předpokladem správného průběhu tepelného zpracování je schopnost chladicího media vytvořit v celém objemu součásti martenzitickou strukturu. Vhodná chladicí media jsou: inertní plyn nebo proud vzduchu, solná lázeň při teplotě $450\div 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ nebo $180\div 220\text{ }^{\circ}\text{C}$, vakuum (je doporučeno přerušit ochlazování při teplotě $320\div 450\text{ }^{\circ}\text{C}$, aby mohlo dojít k vyrovnání teplot, a tím se eliminovala možnost nadměrné deformace a vzniku trhlin), olej o teplotě $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ [56, 58].

Popouštění

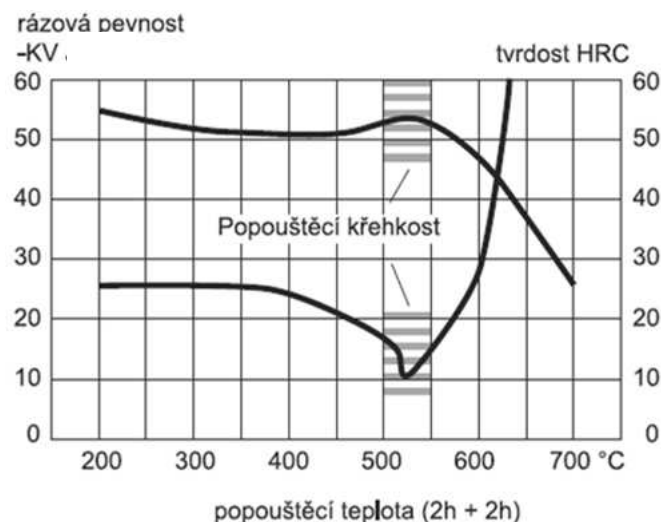
Z popouštěcího diagramu zvolíme dle požadované tvrdosti popouštěcí teplotu. U nástrojů na protlačování a kování popouštět minimálně 2x s mezi ochlazením na teplotu místnosti, u forem pro tlakové lití kovů je nutné popouštět minimálně 3x. Během 1h výdrže na popouštěcí teplotě dojde k popouštění materiálu do hloubky 20mm, přičemž minimální doba výdrže na této teplotě je 2 hodiny. Při teplotách $500\div 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ dochází ke vzniku popouštěcí teploty, proto je nezbytné se těmito teplotám vyvarovat [56, 57].

Rozměrové změny po kalení a popouštění

V průběhu kalení a popouštění dochází k rozměrovým změnám, což je zapříčiněno transformačním a tepelným pnutím. S tímto faktem je nutné počítat při volbě přídavek na opracování, protože jinak by bylo nutné materiál kalit nižší než doporučenou rychlostí. Pro ocel DIEVAR se doporučuje volit minimální přídavek na opracování 0,3% [57, 58].



Obr. 1.16. Popouštěcí diagram [56]



Obr. 1.17. Vliv popouštěcí teploty na vrubovou houževnatost při pokojové teplotě [56]

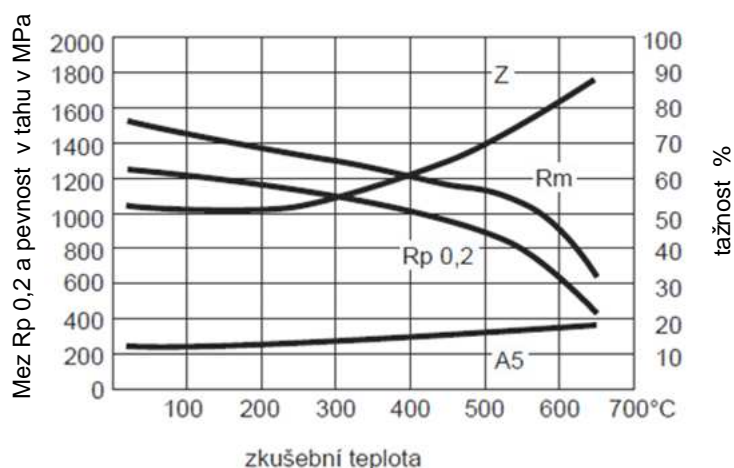
Vlastnosti

Tab. 1.9 Fyzikální hodnoty při různých teplotách [57]

| Teplota | 20 °C | 400 °C | 600 °C |
|--|---------|-----------------------|-----------------------|
| Modul pružnosti [N/mm ²] | 210 000 | 180 000 | 145 000 |
| Tepelná vodivost [W/m·°C] | - | 31 | 32 |
| Měrná hmotnost [kg/m ³] | 7 800 | 7 700 | 7 600 |
| Teplotní součinitel roztažnosti [K ⁻¹] | - | 12,7·10 ⁻⁶ | 13,3·10 ⁻⁶ |

Tab. 1.10 Fyzikální hodnoty při různých teplotách [58]

| | | | |
|------------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Mez kluzu R _{p0,2} | 1 210 MPa | 1 380 MPa | 1 560 MPa |
| Mez pevnosti v tahu R _m | 1 480 MPa | 1 640 MPa | 1 900 MPa |
| Tažnost A ₅ | 13 % | 13 % | 12,5 % |
| Kontrakce Z | 55 % | 55 % | 52 % |
| Tvrdost | 44 HRC | 48 HRC | 52 HRC |



Obr. 1.18. Mechanické vlastnosti při zvýšené teplotě [56]

1.3.3. Ocel TQ1 (označení výrobce)

Charakteristika

Jedná se o legovanou ocel Cr-Mo-V, která je určena pro práci za tepla s vysokou houževnatostí. Vykazuje velmi dobrou stálost při tepelných rázech. Díky způsobu výroby technologií ESU se tento materiál vyznačuje vysokou čistotou a nízkým obsahem stopových prvků. Standardně se dodává ve stavu vyžíhaném na měkko maximálně 220 HB [59].

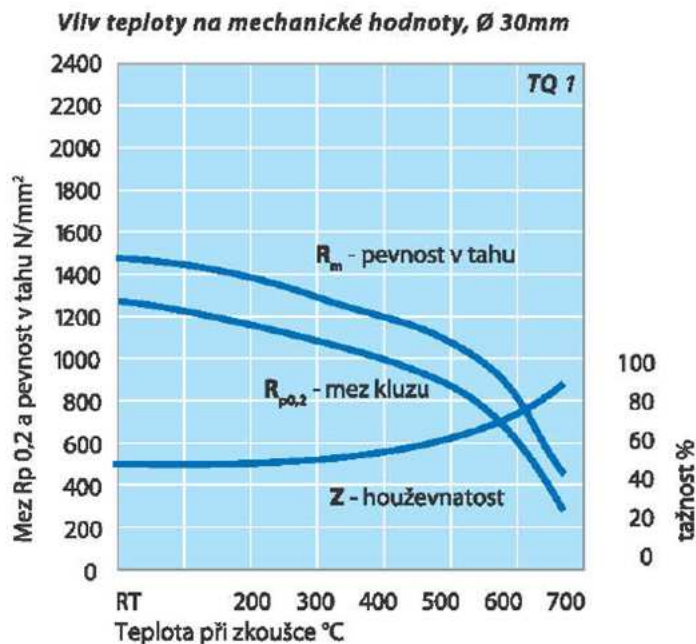
Chemické složení

Tab. 1.11 Chemické složení oceli TQ1 [60].

| Fe [%] | C [%] | Si [%] | Mn [%] | Cr [%] | Mo [%] | V [%] |
|--------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 91,34 | 0,36 | 0,25 | 0,40 | 5,20 | 1,90 | 0,55 |

Použití

Použití této oceli je především pro tlakové lití, zápusťkové kování, tváření za tepla, protlačování [60].



Obr. 1.19. Vliv teploty na mechanické hodnoty oceli TQ1 [59]

1.4 Nejčastěji používané druhy odlévaných materiálů

Druh odlévaného materiálu (slitiny) do jisté míry ovlivňuje nejen průběh samotného procesu lití, ale i trvanlivost formy.

1.4.1. AlSi9Cu3

Nejčastěji používaná slitiny v oboru tlakového lití a to především díky jejím vlastnostem, jakými jsou [61]:

- dobrá slévatelnost,
- menšímu sklonu ke vzniku vnitřních staženin a formování povrchových defektů,
- při obrábění vykazuje dobrou obrobitelnost s výslednou dobrou kvalitou obráběného povrchu.

Nevýhody [61]:

- nízká odolnost proti korozi.

1.4.1.1. Použití

Tato slitina je používána pro výrobu tvarově složitých tenkostěnných odlitků. Především pro složité strojní součásti, automobilový průmysl, součástky pro elektrotechniku, atd. [10].

1.4.1.2. Mechanické vlastnosti

Tab. 1.12 Mechanické vlastnosti slitiny AlSi9Cu3 [10]

| Způsob lití | P/K | T |
|----------------------------|---------|-----|
| Mez kluzu Rp 0,2 [MPa] | 90÷100 | 140 |
| Mez pevnosti Rm [MPa] | 150÷170 | 240 |
| Tažnost A ₅ [%] | 1 | 1 |
| Tvrdość HB | 60÷75 | 80 |

Způsob lití: P-do písku, K-gravitačně do kovových forem, T-tlakově

1.4.1.3. Fyzikální vlastnosti

Tab. 1.13 Fyzikální vlastnosti slitiny AlSi9Cu3 [61, 62]

| | |
|--|---------------------|
| Měrná hmotnost [kg·dm ³] | 2,75 |
| Elektrická vodivost [K ⁻¹] | 13÷17 |
| Součinitel tepelné vodivosti [W/m·K] | 100÷110 |
| Teplotní součinitel roztažnosti [K ⁻¹] | 22·10 ⁻⁶ |

1.4.1.4. Lící parametry

Tab. 1.14 Lící parametry AlSi9Cu3 [61, 62]

| | |
|---------------------------------------|---------|
| Lící teplota [°C] | 650÷700 |
| Tekutost | Dobrá |
| Smrštění [%] | 0,5÷0,8 |
| Odolnost proti vzniku trhlin za tepla | Dobrá |
| Teplota tuhnutí [°C] | 600÷490 |

1.4.1.5. Chemické složení

Tab. 1.15 Chemické složení v % slitiny AlSi9Cu3 [10]

| Al | Ni | Zn | Cu | Sn | Mn | Mg | Fe | Si | Ti | Cr | Pb |
|---------------------|------|-----|-----------------|------|------|-------------------|-----|------------------|------|------|------|
| 79,85 ÷ 85,35 | 0,55 | 1,2 | 2,0 ÷ 4,0 | 0,25 | 0,55 | 0,05 ÷ 0,55 | 1,3 | 8,0 ÷ 11,0 | 0,25 | 0,15 | 0,35 |

1.4.1.6. Použití

Tato slitina je používána pro výrobu tvarově složitých tenkostěnných odlitků. Především pro složité strojní součásti, automobilový průmysl, součástky pro elektrotechniku, atd. [10].

1.4.2. AlSi12

Jedná se o eutektickou slitinu, která má následující vlastnosti [62]:

- velmi dobrou odolnost proti korozi,
- vynikající slévárenské a technologické vlastnosti,
- vysoká odolnost proti tepelným trhlinám,
- dobrou obrobitelnost.

Nevýhody [62]:

- slitina není vytvrditelná,
- sklon ke vzniku staženin u silnějších odlitků,
- má střední pevnost.

1.4.2.1. Mechanické vlastnosti

Tab. 1.16 Mechanické vlastnosti slitiny AlSi12 [63]

| Způsob lití | P/K |
|---------------------------|---------|
| Mez kluzu $R_p 0,2$ [MPa] | 80÷130 |
| Mez pevnosti R_m [MPa] | 170÷240 |
| Tažnost A_5 [%] | 1 |
| Tvrdost HB | 60 |

1.4.2.2. Fyzikální vlastnosti

Tab. 1.17 Fyzikální vlastnosti slitiny AlSi12 [63]

| | |
|---|---------------------|
| Měrná hmotnost [kg·dm ³] | 2,68 |
| Elektrická vodivost [K ⁻¹] | 16÷22 |
| Součinitel tepelné vodivosti [W/m·K] | 130÷160 |
| Tepelný součinitel roztažnosti [K ⁻¹] | 21·10 ⁻⁶ |

1.4.2.3. Licí parametry

Tab. 1.18 Licí parametry AlSi12 [62, 63]

| | |
|---------------------------------------|------------|
| Licí teplota [°C] | 650÷700 |
| Tekutost | vynikající |
| Smrštění [%] | 0,5÷0,8 |
| Odolnost proti vzniku trhlin za tepla | vynikající |
| Teplota tuhnutí [°C] | 570÷580 |

1.4.2.4. Chemické složení

Tab. 1.19 Chemické složení slitiny AlSi12 [64]

| Chemické složení [%] | | | | | | |
|----------------------|------|------|------|----------|-----------|------|
| Al | Zn | Cu | Mn | Fe | Si | Ti |
| 85,22÷88,12 | 0,15 | 0,08 | 0,55 | 0,45÷0,9 | 10,5÷13,5 | 0,15 |

1.4.2.5. Použití

Tato slitina se používá pro výrobu tenkostěnných, nepropustných odlitků, u kterých je požadována vysoká houževnatost a dobrá odolnost proti korozi (lopatky, tělesa pump, žebrová tělesa, skříňové odlitky, atd.) [62].

2 NAVRŽENÉ VARIANTY ŘEŠENÍ

Proč provádět povrchové úpravy

Hlavním důvodem, proč se v poslední době stále častěji používají povrchové úpravy ve formách pro tlakové lití, je snaha o prodloužení jejich životnosti za současného snížení provozních nákladů a množství servisních hodin. Vhodně zvoleným typem povrchové úpravy taktéž dochází i k výraznému zlepšení povrchu odlitku a snížení množství nalepovaného kovu na stěny formy [51, 65].

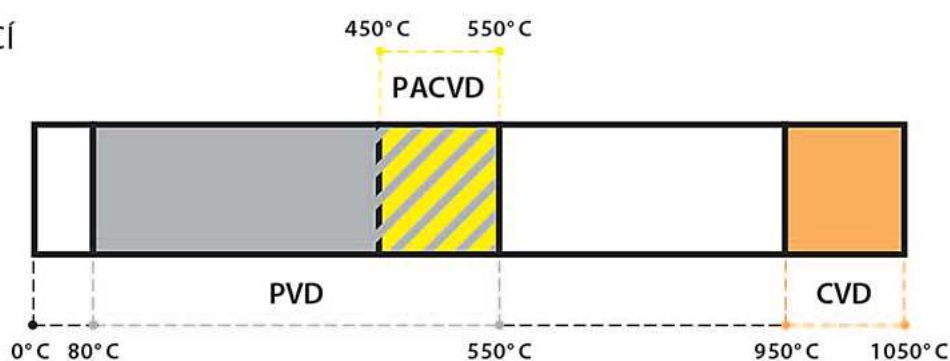
V průběhu licích cyklů jsou především malé výstupky a jádra formy vystaveny enormnímu teplotnímu namáhání, při kterém dochází k nadměrnému opotřebení těchto částí [50, 51]

Povrch nástroje musí především odolávat vysokým teplotám, ale zároveň musí vydržet i vysoký tlak [65].

Navržené druhy povrchových úprav:

- PVD povlaky (Physical Vapour Deposition),
- PACVD povlaky (Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition),
- Nitridace.

POVLAKOVACÍ TEPLOTY



Obr. 2.1. Rozsah povlakovacích teplot jednotlivých druhů povlaků [66]

2.1 PVD povlakování

2.1.1. Charakteristika

PVD povlakování je nejčastěji prováděno jako poslední operace při výrobě součástí. Jedná se o fyzikální depozici tvrdých povlaků na základní materiál. Nejčastěji, se u této metody povlakování depoziční teplota pohybuje v rozmezí 250 °C až 450 °C, ale existují i výjimky, při kterých je možné nanášet PVD povlak při teplotách dosahujících 600 °C, ale taktéž je možná depozice již při teplotě okolo 70 °C. Depoziční teploty se pohybují hluboko pod popouštěcí teplotou ocelí pro práci za tepla, rychlořezných ocelí, ale také i některých ocelí pro práci za studena, což je nespornou výhodou oproti metodě CVD. U PVD povlakování nedochází ke vzniku deformací, ztrátě houževnatosti a ovlivnění mikrostruktury oceli [66 - 71].

Dochází k nanášení povlaků ve formě monovrstvy, multivrstvy, nebo také gradientní vrstvy. V současné době vznikají variace vícevrstevných povlaků, jako jsou supermřížkové, nebo nanostrukturní [66, 68, 69, 71].

Při volbě typu povlaku je nezbytné uvažovat nad provozními podmínkami, při kterých bude nástroj provozován [66, 69, 70].

Při PVD povlakování dochází nejčastěji k nanášení depozičních vrstev o tloušťkách 2÷5 µm. Přičemž v současné době je možné nanášení vrstev silnějších jak 15 µm, ale také vrstev o síle je několik stovek nm [66, 67, 69].

Touto metodou povlakování je možné povlakovat nejen oceli a neželezné kovy (mosaz, hliník), ale také karbidy wolframu, nebo například galvanicky pokovené plasty. Limitující podmínkou pro nanášení vrstev PVD je elektrická vodivost součásti a stabilitou základního materiálu při depoziční teplotě [66, 67, 70, 71].

2.1.2. Příprava povrchu před povlakováním

Před samotným započítím nanášení povlaku je nezbytná správná příprava povrchu součásti, na který bude PVD povlak nanášen. Je důležité povrch zbavit koroze, tuků, olejů, anorganických solí, zbytků nalepených částic materiálů (především plastů, u kterých dochází k ulpívání mikroskopických částic na povrchu), popřípadě přípravků na ochranu proti korozi [68, 72].

Pokud u součásti dochází k výskytu ostrých hran, nebo nerovností, je nezbytné jejich odstranění, protože právě na těchto hranách dochází k odlupování nanesené vrstvy povlaku [68, 69].

Optimální volba přípravy povrchu součásti je velmi důležitá pro dosažení požadované kvality PVD povlaku [68, 72].

Jednotlivé druhy úprav povrchu před nanášením PVD povlaků:

a) Mokrý čištění

Jedná se o kombinované metody, které využívají oplachy, tlakové oplachy, elektrochemické metody, ultrazvuk, vakuové sušení, případné odpaření (vyhřátí) těkavých kapalin. V samotné praxi dochází nejčastěji k používání kapalných čisticích prostředků, jejichž dávkování probíhá přímo do lázně. Nejběžněji se můžeme setkat s čisticími roztoky, které obsahují KOH (hydroxid draselný), nebo NaOH (hydroxid sodného). Jedná se o tak zvané alkalické prostředí. Pokud bychom potřebovali zvýšit odmašťovací účinek čisticí lázně je možné tyto roztoky kombinovat s malými množstvími smáčedel, nebo kyseliny fosforečné či citronové. Kombinací zásaditého i kyselého prostředí v oddělených lázních, může mít za následek zvýšení čisticího účinku lázně. Základem čisticích lázní je demineralizovaná voda. Po skončení čisticího procesu následuje oplach součásti. Je nezbytné za pomoci pasivátoru ochránit součást před možností koroze, ale také ji především zbavit zbytků čisticích lázní. Používají se pasivátory s krátkou dobou ochrany do 2 dnů, což se v praxi ukázalo jako dostačující. Při kombinaci oplachových lázní s pasivátory je nezbytné, aby se v těchto lázních pokud možno eliminovalo množství obsahovaných solí, případně i dalších rozpouštěcích látek ve vodě. Prostředky na krátkodobou ochranu součástí nesmí nijak negativně ovlivnit adhezi připravovaných vrstev [68, 70, 72].

Abychom dosáhli kvalitního povrchu bez zbytkových map, je nezbytné, aby osušení připravované součásti proběhlo co možná nejrychleji. Pro tyto účely se používají metody založené na principu odpaření, či odstředění zbytkové kapaliny ve vakuu nebo na vzduchu [68, 70].

b) Odmaštění

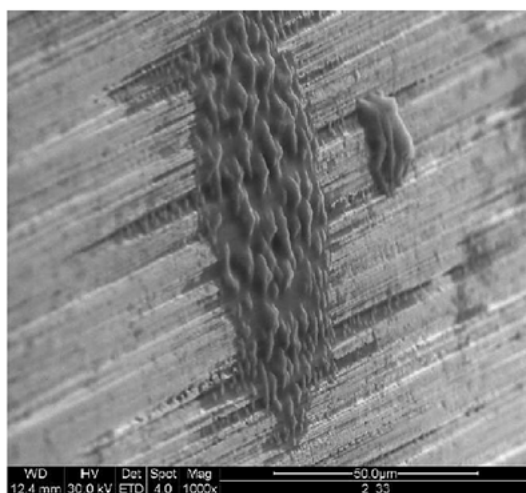
K odmašťování a konzervaci dřívě hojně užívané petroleje či benzíny v současné době nahrazují modernější metody založené na způsobu ropných derivátů. K nahrazení dochází především kvůli stále se zpřísňujícím ekologickým normám. Tyto ropné deriváty v sobě obsahují nearomatizované uhlovodíky a smáčedla, která zbraňují nadměrnému vypařování, ale současně obstarávají dobrou smáčivost. K odmašťování se využívají jednoduchá odmašťovací zařízení [70, 72].

c) Pískování

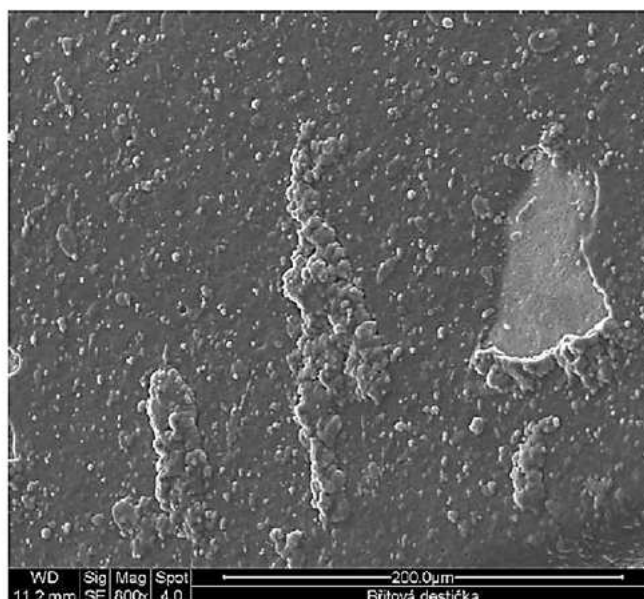
Tato metoda též někdy nazývaná mikropískování je založena na principu tlakového metání abrazivních částic Al_2O_3 nebo SiC . Dochází při ní k odstraňování nalepených, napečených, zalisovaných, či jinak přichycených nečistot na povrchu součásti. Veliký vliv na výslednou kvalitu a rozměry pískované součásti má právě za následek správná volba velikosti abrazivních zrn, jejichž rozměry se pohybují v rozmezí 20÷100 μm . Výslednou kvalitu plochy též velmi ovlivňují další aspekty, jako jsou mechanické vlastnosti součásti, zkušenost obsluhy pískovacího zařízení, tvar součásti, volba parametru pískování [70, 72, 73].

Nejběžněji se tato metoda používá při odstraňování zbytků povlaků na již dřívě povlakované součásti.

V žádném případě není možné použít pro odstranění nečistot z povlakované součásti skleněné kuličky [68].



Obr. 2.2. Nedokonale očištěný obsahující zbytky nečistot povrch nástroje před povlakováním [74]



Obr. 2.3. Zhoršená přilnavost zapříčiněná nedokonalým očištěním povrchu [74]

2.1.3. Proces povlakování

K nanášení povlaků dochází pomocí reakce mezi částečně ionizovanými parami a inertními (Argon) nebo reaktivními (Dusík, Kyslík, Acetylen) plyny. Ionizované páry se uvolňují ze zdroje částic, kterými jsou terče, nebo targety. Výsledkem je tenká tvrdá vrstva se specifikovaným složením. Pomocí této metody povlakování jsou na povrch základní součásti nanášeny vrstvy karbidů, nitridů, nebo karbonitridů, jakými jsou Zr, Cr, Ti, popřípadě slitin AlCr, TiSi, AlTi. Nanesený povlak dosahuje tloušťky vrstvy 2÷5 μm [67, 68, 70, 71].

Nejčastěji používané metody:

- napařování,
- naprašování.

2.1.3.1. Naprašování

Jedná se fyzikální odprašovací proces, při kterém dochází k nanášení tenkých vrstev povlaků na základní materiál. Tento proces ve většině případů probíhá v povlakovací komoře za přítomnosti vysokého vakua, popřípadě nízkého tlaku, který je nižší než 0,7 Pa [75, 76].

Reaktivní naprašování

V prvním kroku dochází u povlakovaných dílů nejprve k ohřevu v povlakovací komoře, ve které je vyvinuto vysoké vakuum. Dalším krokem je iontové leptání pomocí ostřelování ionty argonu, čímž vzniká na povlakované součásti čistý povrch bez kontaminací. V posledním kroku je na terč přivedeno záporné elektrické napětí o velikosti tisíce voltů, díky čemuž dochází k výboji v plynu a zapálení oblouku, a tím vznikají kladné argonové ionty. Přičemž jsou tyto ionty urychlovány směrem k terči

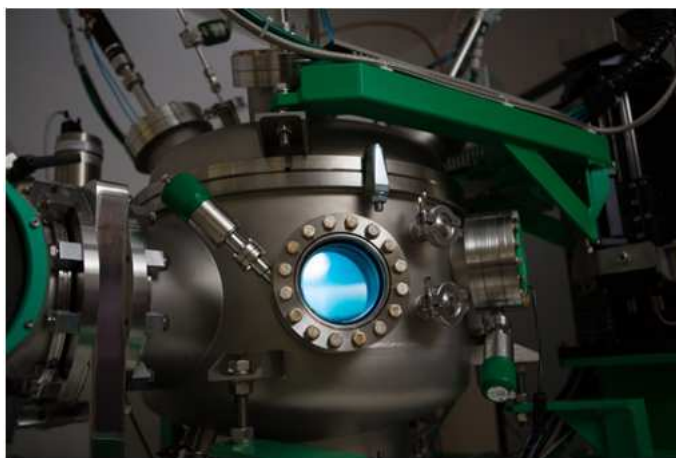
a následkem srážek mezi těmito ionty a terčem dochází k rozprašování materiálu do prostředí povlakovací komory. Mezi vzniklými částicemi rozprašeného kovu a reaktivním plynem dochází k reakci. Následkem této reakce dochází k nasycení reaktivního plynu částicemi budoucího povlaku. Díky těmto reakcím se na povlakované součásti vytvoří tenká, ale kompaktní vrstva, která vykazuje požadované složení a strukturu [76, 77].

Magnetronové naprašování

Celý proces probíhá za vysokého podtlaku (cca 1Pa) ve vakuové komoře, kde dochází k bombardování terče, který je funguje jako katoda, částicemi inertního plynu (Argonu), který slouží jako anoda [67, 68, 75].

Samotný proces začíná tím, že v blízkosti terče dojde k zažehnutí inertního plynu (Argonu) a vzniku doutnavého výboje. Tímto dochází k rozprašování materiálu a jeho nanášení na povlakovanou součást ve formě tenkých vrstev. Ke zvýšení efektivity celého procesu se pod terč umísťuje magnet, který zapříčiní lepší ionizaci plynu (Argonu), a tím přispívá k dokonalejšímu rozprašování [67, 68, 75, 78 - 80].

Za použití střídavého vysokofrekvenčního signálu je možné nanášet i nevodivé materiály. V případě, že dojde ke kombinaci pracovního plynu s plynem reaktivním (Dusík, Kyslík), tak dochází ke vzniku nitridové popřípadě oxidové vrstvy [68, 78 - 80].



Obr. 2.4. Povlakovací komora pro magnetronové naprašování [81].

Poměrně novým způsobem magnetronového naprašování je pomocí cyklických rotačních metod. Touto metodou je dosahován vyššího využití materiálu terčů (targetů) a dokonalejší uspořádání katod. Díky tomu je možné získávat kvalitnější vícesložkové povlaky [80, 81].

Pomocí cyklických rotačních metod je možné zhotovit tak zvaných nanovrstev. Tyto vrstvy vznikají střídajícími se velmi tenkými vrstvami o rozdílných vlastnostech. Podle druhu složení povlaku vznikají jednotlivé vrstvy o tloušťce v rozmezí 3÷10 nm [80, 82].



Obr. 2.5. Uspořádání povlakovací komory s centrálním magnetronem [34].

Výhody magnetronového naprašování [67, 68, 75, 78 - 80]:

- možnost povlakování i větších součástí,
- rovnoměrná vrstva povlaku,
- přesný poměr složek povlaku,
- malé tepelné ovlivnění povlakované součásti,
- možnost zhotovení povlaků z nevodivých materiálů,
- možnost umístění povlakované součásti a terče do velmi malé vzdálenosti od sebe,
- možnost zhotovení terčů různých tvarů (válec, deska, ...),
- vysoká životnost terče,
- velmi nízká drsnost vzniklého povrchu,
- vysoká kvalita vzniklého povrchu.

Nevýhody magnetronového naprašování [68, 75, 78 - 80]:

- pomalejší depozice vrstev ve srovnání s metodou nízkonapětového oblouku,
- během povlakování vzniká velké množství zbytkového tepla, které je nutné odvádět,
- malá využitelnost materiálu,
- snížení možnosti úpravy vnitřního napětí povlaku z důvodu nižší ionizace odrašovaného materiálu,
- obtížný způsob řízení.

2.1.3.2. Napařování

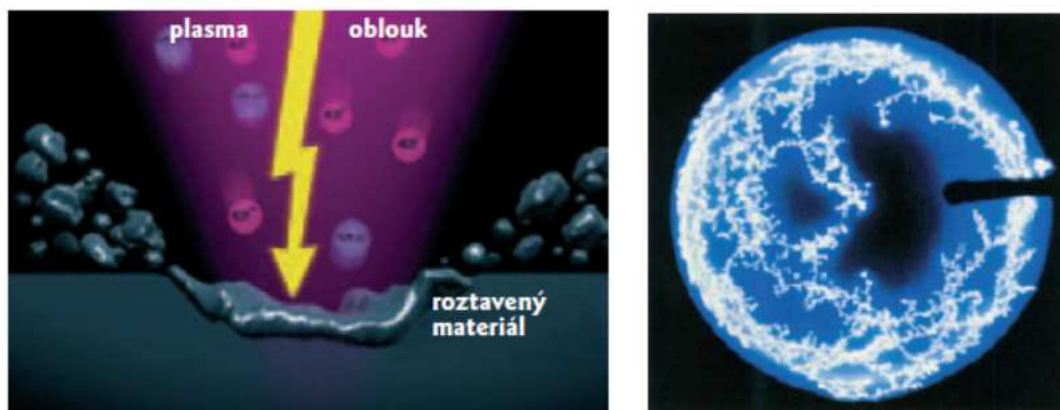
U tohoto způsobu nanášení tenkých vrstev je zapříčiněno odpařováním materiálu z terče. Tento terč je postupně ohříván ve vakuační komoře za přítomnosti vakua, čím dochází k odpařování atomů z terče a jeho následné depozici na základní materiál. Terč je umístěn ve spodní části povlakovací komory. V čím větší vzdálenosti se povlakovaná součást nachází od terče, tím je dosaženo slabší vrstvy povlaku na jejím povrchu [66, 74].

Obloukové napařování

V současné době se jedná spolu s napařováním o nejčastěji používanou metodu k nanášení PVD povlaků [67, 71].

Proces povlakování probíhá ve vysokém vakuu, přičemž princip této metody spočívá v opakujícím se obloukovém výboji, jehož následkem dochází k odpařování materiálu z terče [67, 71].

Katodou je v tomto případě tvoří terč a anodou je nejčastěji vakuová komora. K odpařování katody dochází pouze v místě katodové skvrny, kde vzniklý oblouk dosahuje teploty až 15 000 °C a průměru 10 µm. Zároveň s odpařováním materiálu z terče dochází i k jeho ionizaci. Vlivem záporného předpětí dochází k urychlování ionizovaného materiálu směrem k povlakované součásti. Současně dochází k ionizaci atomů plynné atmosféry, kterou tvoří například Argon nebo Dusík. Po dosažení povrchu povlakované součásti tyto ionizované atomy vytvářejí vlastní deponovanou vrstvu. Vlivem takto vysokých teplot, které jsou dosahovány na povrchu terče, je možné odpařit takřka každý vodivý materiál [67, 68, 76].



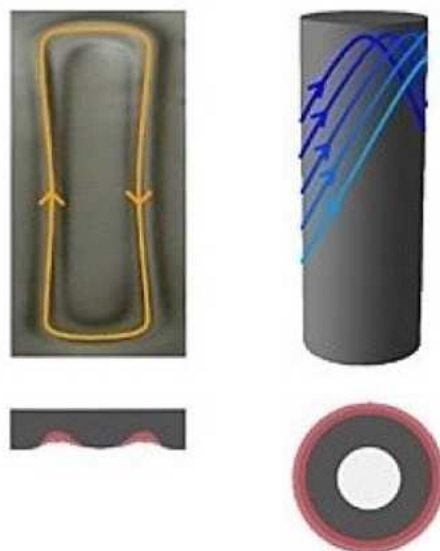
Obr. 2.6. Schéma a pohyb katodové skvrny [83].

Druhy používaných elektrod u obloukového napařování

Běžně jsou u konvenčních metod používány takzvané planární elektrody. Nevýhodou u těchto elektrod je, že dochází v průběhu pracovního cyklu za použití silného magnetického pole k nadměrnému opotřebení vlivem soustředěné eroze. Tomuto jevu je možné předejít použitím rotujících válcových terčů, protože právě vlivem otáčení nedochází k soustředěné erozi a tím je několikanásobně prodloužena jejich životnost [71, 83].

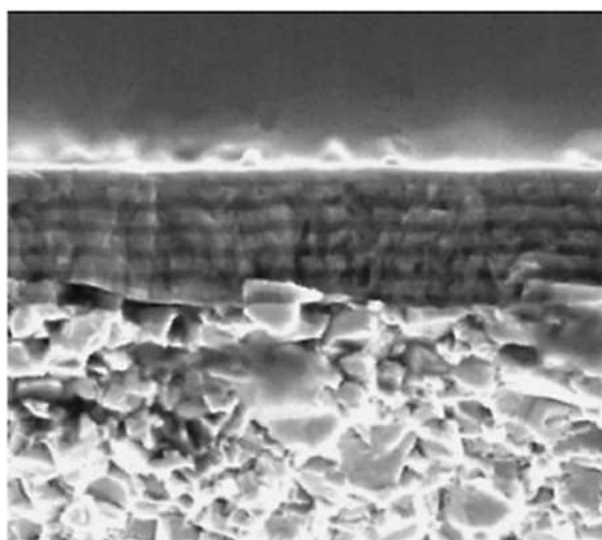
Terče mohou být v povlakovací komoře umístěny třemi způsoby [71, 83]:

- centrální umístění terčů ve středu povlakovací komory,
- vně povlakovaných součástí,
- kombinace obou předchozích způsobů.



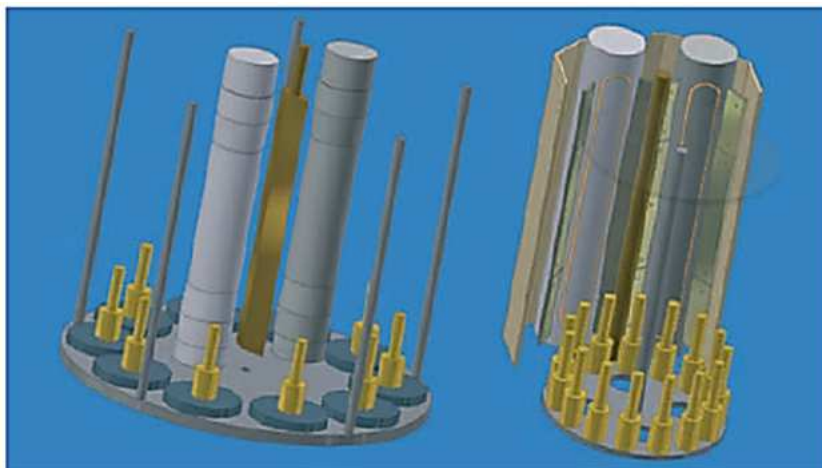
Obr. 2.7. Planární (vlevo) a válcový (vpravo) terč (target) [83]

Vlivem různých umístění pozic terčů je také možné měnit jejich počet. Při nanášení vícesložkových povlaků je možné použít dva, tři, ale i čtyři různé druhy terčů. Rychlost růstu, ale i drsnost vznikajících vrstev je možné ovlivnit různými hodnotami proudu, kterým působíme na terč. Tímto způsobem je možné připravovat mono-, multi- a gradientní vrstvy základních povlaků [67, 71, 76, 83].



Obr. 2.8. Multivrstva povlaku nanesená na základním materiálu [84].

V současné době jsou v průmyslové praxi touto metodou vytvářeny kombinované základní struktury, které jsou většinou tvořeny desítkami mono-, multi- a gradientními vrstvami s rozdílnými parametry, které jsou uzpůsobeny požadovaným parametrům budoucí vrstvy [67, 71, 76].



Obr. 2.9. Centrálně umístěné terče (vlevo) a bočně umístěné terče (vpravo) [83]

Ke zlepšení přilnavosti deponované vrstvy na základní materiál je využito několik kroků. Prvním z nich je ohřátí součásti na cca 550 °C a evakuaci 10-3 Pa, kdy dochází k odplynění povlakované součásti. Po tomto kroku následuje iontové čištění, kdy je využito iontového čištění a doutnavého výboje, díky čemuž dochází k očištění povrchu povlakované součásti na atomární úrovni. Na závěr je použita depozice adhezních vrstev. Nejčastěji jsou k této depozici používány různé modifikované CrN a TiN vrstvy [67, 71, 76, 83].

Díky neustálému vývoji povlakovacích vrstev je v dnešní době možné nanášet vrstvy o tloušťkách až 100 μm (ve kterých je využito řízeného vnitřního napětí). Dosahovaná drsnost Ra povlakovaných vrstev je okolo 0,05÷2 μm, což jsou hodnoty, kterých je možné dosáhnout i magnetronovým naprašováním. Je také možné zhotovovat povlakované vrstvy bez obsahu Ti, čímž vznikají povlaky na bázi AlN nebo AlSiN [76, 83].

Teplota dosahovaná v průběhu povlakovacího procesu se pohybuje v rozmezí od 400÷550 °C při tlaku 0,5÷3 Pa. Proud oblouku je v rozpětí 50÷450 A. Doba povlakování je 2÷5 hodin a dosahovaná tloušťka povlakované vrstvy je 3÷5 μm [67, 71, 83].

Výhody obloukového napařování [71]:

- možnost odpařování velkého množství elektricky vodivých materiálů,
- nízké tepelné ovlivnění povlakovaného materiálu,
- možnost rozmanitého vnitřního uspořádání terčů,
- efektivní ionizace reaktivního plynu a odpařovaného materiálu pomocí plazmového oblouku.

Nevýhody obloukového napařování [71]:

- možnost zhotovování povlaků pouze z elektricky vodivého materiálu.

2.1.4. Vlastnosti PVD povlaků

2.1.4.1. Adheze

Jednou z nejdůležitější vlastností je dobrá adheze, aby povlak velmi dobře přilnul k základnímu materiálu a bylo tak možné plně využít vlastností PVD povlaků. Kvalita adheze záleží především na dobré přípravě základního materiálu. Udává se, že za dobrou adhezi lze považovat takovou, která dosahuje hodnot 60 N a větších. K vyhodnocování tvrdosti povlaků je používán takzvaný scratch-test. V neposlední řadě je adheze také závislá na vlastnostech podkladového materiálu a na tloušťce zhotoveného povlaku [85, 86].

2.1.4.2. Tvrdost

U tenkých vrstev je tvrdost udávána jako „odolnost proti vnikání cizích předmětů“. Nejčastěji u PVD povlaků dochází k jejich opotřebení vlivem abrazivního otěru. Z tohoto důvodu je základem otěruvzdorných vrstev vysoká tvrdost [85, 86].

K měření tvrdosti PVD povlaků se využívají speciální přístroje – mikrotvrdoměry, protože je během měření nezbytné zajistit, aby nedocházelo k vnikání hrotu do základového materiálu. Měřicí hrot vniká maximálně do 1/10 tloušťky povlakované vrstvy [51, 85, 86].

Tab. 2.1 Přehled dosahovaných hodnot tvrdostí u nejběžnějších vrstev PVD povlaků [85, 86]:

| Druh povlaku | Tvrdost [GPa] |
|--------------|---------------|
| TiN | 23 |
| TiCN | 30 |
| CrN | 17 |
| TiAlN | 33 |
| DLC | 25 |
| TiAlSiN | 45 |
| CrAlSiN | 35 |

2.1.4.3. Drsnost

Výsledná drsnost povrchu je závislá nejen na kvalitě povrchu povlakované součásti, ale také na druhu povlaku [51, 85].

2.1.4.4. Tloušťka

Tato charakteristika je jednou z nejdůležitějších vlastností povlaků, protože velmi zásadně ovlivňuje trvanlivost povlaku. Důležité je, aby tloušťka povlaku odpovídala požadovaným nárokům, které na ní budou kladeny v průběhu životnosti povlakované součásti [51, 85, 86].

2.1.4.5. Kluzné vlastnosti

Ze vzrůstající teplotou dochází ke zhoršování fyzikálně-chemických vlastností základního materiálu. Díky povlaku dochází ke snížení frikčních sil a tím výrazně dochází ke snížení tepelného zatížení povlakované součásti [51, 49, 85, 86].

2.1.4.6. Odolnost vůči oxidaci

Oxidace se rozlišuje na dva základní typy, a to buď na hloubkovou, nebo povrchovou. Povrchovou oxidací dochází k pasivaci povrchu, která může mít za následek zamezení další oxidace. Během hloubkové koroze ovšem dochází ke znehodnocení vrstvy povlaku, následkem čehož dochází k poklesu tvrdosti této vrstvy. U PVD povlaků jsou proto udávány maximální teploty jejich použitelnosti. Hodnota těchto maximálních teplot je dána odolností vrstev proti zmiňované oxidaci [49, 85, 86].

2.1.4.7. Chemická stabilita

Chemická stabilita nám udává odolnost vrstvy povlaku proti chemické reakci s odlívaným (obráběným) materiálem a to především za vyšších teplot, které vznikají v průběhu tlakového lití. Chemická stabilita se může měnit v závislosti na odlívaném materiálu a průběhu lícího cyklu [85, 86].

2.1.4.8. Tepelná stabilita

Vytvořený povrch v důsledku intenzivního iontového bombardování je termodynamicky nestabilní. V průběhu lícího cyklu dochází k růstu teplot, což může mít za následek přeměnu vnitřní struktury, jakou je změna krystalického uspořádání, nárůst krystalů, vnitřního napětí. Následkem těchto změn dochází k ovlivnění mechanických vlastností [49, 85].

V současné době vykazují nejvyšší tepelnou stabilitu nanokrystalické nanokompozity a povlaky na bázi CrAlN [49].

2.1.5. Druhy PVD povlaků používaných ve formách pro tlakové lití

TiN (nitrid titanu)

Jedná se o základní a nejdéle používanou vrstvu, která již v současnosti je dle statistických průzkumů považována za dožívající a je nahrazována modernějšími vrstvami na bázi TiAlN. Vrstvy TiN dosahují mikrotvrdosti 20÷25 GPa. Nespornou předností tohoto povlaku je jeho dobrá adheze a přilnavost k základnímu materiálu. Barva povlaku je zlatá [84, 86].

TiAlN (titan aluminium nitrid)

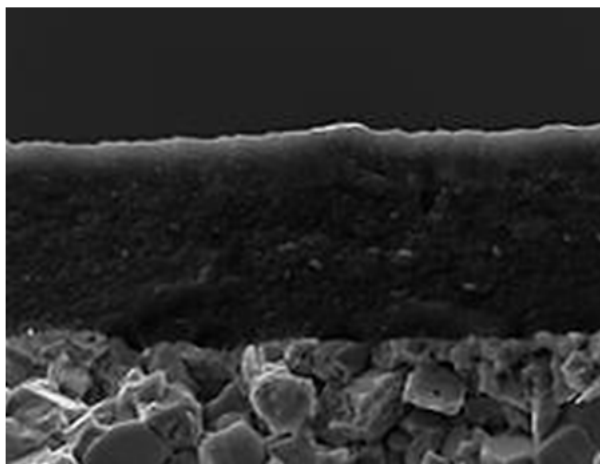
Tento povlak vykazuje vysokou odolnost vůči vysokým teplotám, dobrý poměr houževnatosti a tvrdosti. Dosahovaná mikrotvrdost tohoto povlaku se pohybuje v rozmezí 25÷33 GPa. Odstín povlaku se pohybuje v rozmezí růžovofialové až po černošedou. Jednou z jeho vlastností je schopnost vytvářet na povrchu Al₂O₃. Tato vrstva přispívá ke zlepšení difúzní odolnosti, při obrábění zlepšuje řezné vlastnosti a napomáhá ke snížení tření [84, 86].

AlTiN

Tyto povlaky jsou především určeny pro moderní produktivní obrábění hlavně z toho důvodu, že vytvářejí izolační vrstvu mezi nástrojem a třískami. Povlaky TiAlN a AlTiN se velmi podobají. Hlavní rozdíl mezi nimi je v obsahu Al. Pokud obsah Al přesáhne 50 % je povlak nazýván AlSiN. Obsah Al ovšem nesmí přesáhnout 65÷70 %, protože poté dochází k poklesu otěruvzdornosti a tvrdosti [87, 88].

TiSiN

Tento povlak je především určen pro vysokorychlostní obrábění tvrdých materiálů bez použití maziva, popřípadě jen s jeho velmi malým množstvím. Vykazuje vysokou tvrdost, dobré izolační vlastnosti, vysokou tepelnou odolnost a velmi dobré antioxidační vlastnosti nanokompozitních povlaků [88, 89].



Obr. 2.10. Vzhled TiSiN vrstvy [89].

CrAlSiN

Jedná se o nanokompozitní povlak s vysokým obsahem chrómu. Vykazuje velmi dobrou přilnavost k povlakovanému povrchu, což je zapříčiněno tím, že má podobnou tepelnou roztažnost jako ocel. Mezi jeho další nesporné výhody patří vysoká antioxidační schopnost a odolnost proti nalepování. Na obrázku 2.11 je znázorněný CrAlSi terč pro nanášení CrAlSiN vrstev metodou PVD [90, 91].



Obr. 2.11. CrAlSi terč pro nanášení CrAlSiN vrstev metodou PVD [73].

2.2 PACVD povlakování (Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition)

2.2.1. Charakteristika

PACVD je plazmou aktivovaný CVD proces. Povlak je vytvářen z plynné fáze a k jeho nanášení dochází za teplot 470÷530 °C. Touto metodou je možné dosáhnout u deponovaných vrstev koeficientu tření až 0,1. Použití tohoto způsobu povlakování je k nanášení DLC (diamantu podobný uhlík) povlaků, někdy též nazývaných ADLC (amorfní diamantu podobný uhlík). Během povlakování nedochází ke vzniku deformací povlakované součásti. Nanášený povlak dosahuje tloušťky v rozmezí 2÷3 μm. Tvrdost povlaků se pohybuje v rozmezí 10÷40 GPa [65, 92].

Výhody [65, 92]:

- možné provádět nitridaci a povlakování ve společném procesu,
- není zapotřebí dosahovat tak vysokých hodnot vakua jako u metody PVD,
- není zapotřebí s povlakovanými součástmi otáčet,
- možnost povlakovat rozměrné součásti (až 1250 kg),
- možnost zhotovovat povlaky i na velmi členitých součástech, bez nutnosti jejich otáčení.

2.2.2. Příprava povrchu před povlakováním

Nespornou výhodou PACVD metody povlakování je fakt, že je možné v jedné povlakovací komoře provést iontové očištění povrchu, nitridaci a samotný proces povlakování součásti [65, 92, 93].

Průběh iontového čištění povrchu spočívá v bombardování povrchu povlakované součásti kladně nabitými ionty pracovního plynu, na kterém jsou uchyceny atomy nečistot. Tyto ionty díky své vysoké kinetické energii (cca 10 eV) při dopadu na povrch povlakované součásti předávají svoji energii, důsledkem čehož jsou z povrchu povlakované součásti vymršťovány nečistoty [92, 93].

2.2.3. Proces povlakování

Samotný proces povlakování se dá rozdělit do třech kroků [62, 92]:

- 1) *Iontové čištění povrchu* – popsáno v předchozí podkapitole.
- 2) *Plazmová nitridace povrchu* – použitím plazmové nitridace dochází ke zlepšení přilnavosti povlaku k povlakované součásti.
- 3) *Nanášení povlaku* – nejprve dojde k naprášení kovové vrstvy pojiva na povlakovanou součást a posléze dochází k přivedení napětí (vysokofrekvenční střídavé napětí, nízkofrekvenční střídavé napětí, pulzní stejnosměrné napětí, stejnosměrné napětí). V dalším kroku je do povlakovací komory vpuštěn plyn, ve kterém jsou obsaženy materiály budoucího povlaku. Dojde v povlakovací komoře ke vzniku elektrického výboje v plynu. Během výboje dochází k uvolňování atomů vodíku a uhlíku. Tyto uvolněné atomy vytvářejí na povlakované součásti kompaktní vrstvu povlaku.

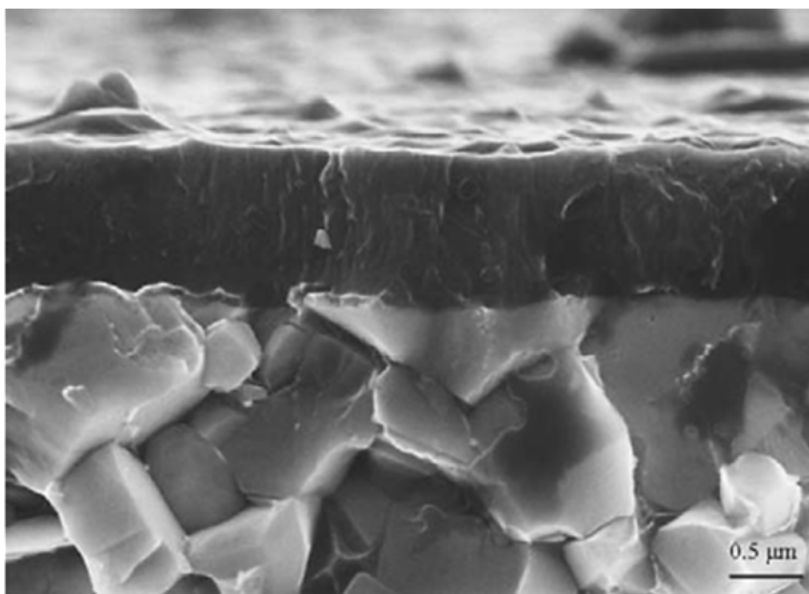
2.2.4. Druhy povlaků používaných ve formách pro tlakové lítí

TiB₂ (Titan borid)

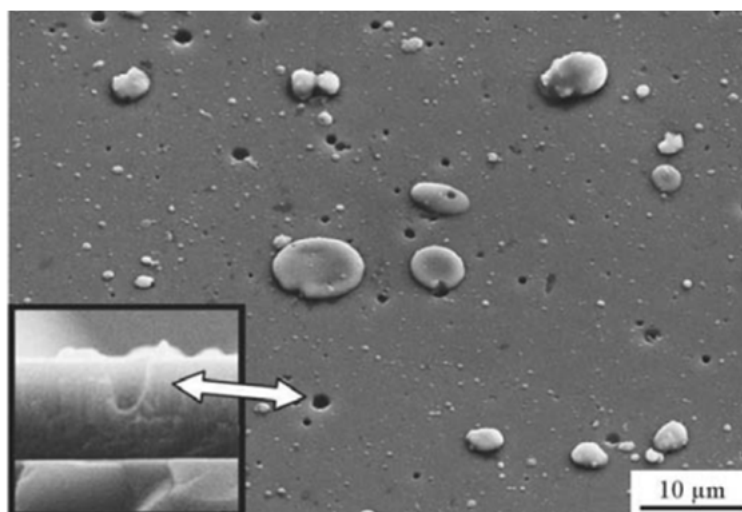
Jedná se o nový keramický materiál, jehož chemické složení je $\text{Ti} > 67,5 \%$ a $\text{B} > 30,5\%$. Vykazuje velmi dobré fyzikální a chemické vlastnosti, vysokou tvrdost 34 GPa a vysoký bod tání okolo 2 980 °C. Poměrně dobře odolává náhlým změnám teplot a tím oddaluje vznik mikrotrhlin [94, 95].

TiBN

Přidáním Boru do TiN došlo k výraznému zlepšení mechanických, tribologických a strukturních vlastností těchto povlaků. Povlaky vznikají jako jedno, popřípadě dvou složkové [89, 96].



Obr. 2.12. Lom povlakem TiBN naneseném na slinutém karbidu [96].



Obr. 2.13. Výsledný povrch naneseného povlaku na slinutém karbidu [96].

2.3 Nitridace

Nitridace patří do skupiny chemicko tepelného zpracování. Samotný proces nitridace je založen na sycení povrchu ocelové součásti dusíkem. Vzniklá povrchová vrstva vykazuje lepší otěruvzdornost, korozivzdornost, únavové vlastnosti, nižší koeficient tření a vyšší tvrdost povrchu oproti základnímu materiálu. Po nitridaci se již neprovádí kalení [27, 97, 98].

Nitridaci je možné provádět třemi základními způsoby:

a) *Nitridace v solné lázni*

Proces nitridace probíhá v roztocích solných lázní, jejichž hlavními složkami jsou kyanidy a kyanatany. K rozkládání lázně dochází za působení vzdušného kyslíku, který napomáhá uvolňování atomárního dusíku, tímto dochází k jeho difundaci do povrchu součásti. Průběžně s uvolňováním dusíku dochází také k uvolňování uhlíku, který ovšem do povrchu součásti nedokáže difundovat, což je zapříčiněno nízkou teplotou při které nitridační proces probíhá. Během procesu je důležité, aby docházelo k míchání solného roztoku, a tím bylo zajištěno jeho okysličení [27, 98].

Nitridace v solné lázni probíhá v rozmezí teplot 540÷570 °C. Tímto způsobem nitridace je dosahováno menší tloušťky nitridované vrstvy v porovnání s jinými způsoby nitridace [97, 98].

b) *Nitridace v plynu*

Zdrojem dusíku je v tomto případě nejčastěji plynný amoniak. Při nitridačních teplotách dochází k jeho uvolňování do povrchu součásti, kde společně s legujícími prvky vytváří nitridy a intersticiální tuhý roztok. Následkem přítomnosti nitridů dochází ke zvyšování tvrdosti povrchové vrstvy. Pokud bychom chtěli docílit ještě vyšší tvrdosti, je vhodné použít oceli s vyšším obsahem hliníku nebo chromu. Tyto prvky mají schopnost vytvářet podstatně tvrdší nitridy než železo. Použitím těchto prvků také dochází ke zmenšení křehkosti vzniklé vrstvy [97 - 99].

Před nitridací je vhodné ocel zušlechtit. Zušlechťovací teplotu se doporučuje volit o 50÷100 °C vyšší než teplotu samotné nitridace (tímto nedojde k výraznému ovlivnění pevnosti jádra). Nitridace v plynném prostředí probíhá za teplot 500÷540 °C. Tloušťka vzniklého nitridační vrstvy se nejčastěji pohybuje v rozmezí 0,1÷0,5 mm. Dosahovaná tvrdost je cca 1100 HV. Vzniklá povrchová vrstva vykazuje velmi dobré hodnoty otěruvzdornosti, odolnosti vůči opotřebení a zadírání [98, 99].

K ochraně částí povrchu proti vzniku nitridované vrstvy se povrchy galvanicky pocínuje, nebo se používají pájky s obsahem cínu [27].

Nitridace v plynu se používá u ocelí určených pro práci za tepla i za studena a také pro výrobu dílů do forem pro tlakové lití. Není vhodné nitridovat oceli s vyšším obsahem chromu jak 5 % [98].

c) *Plazmová nitridace*

Při použití tohoto druhu nitridace na vysokolegovanou ocel dochází ke zvýšení tvrdosti povrchu, díky čemuž se zlepšují některé její vlastnosti (otěruvzdornost,

zadírání, opotřebení). Důsledkem nitridace dochází vlivem působení tlakových sil na povrchu součástí ke zvýšení meze únavy. Možnost zhotovení nitridované vrstvy na většině druhů ocelí, litin, dokonce i velmi porézních spékaných součástí, ale i ocelí s obsahem chrómu vyšším jak 12 %. U korozivzdorných ocelí a slitin s obsahem niklu nedochází výraznému snížení jejich korozní odolnosti. Výsledná tvrdost povrchu po plazmové nitridaci převyšuje 1000 HV [97 - 99].

Plazmovou nitridaci je možné použít před povlakování metodou CVD či PVD [37, 98].

Samotný proces nitridace probíhá za nízkého tlaku ve směsi vodíku, dusíku a libovolného plynu, který napomáhá uvolňování uhlíku. Nitridovaná součást je zapojena jako katoda a stěna pece jako anoda. Působením elektrického napětí dochází mezi anodou a katodou ke vzniku doutnavého výboje modro-fialové barvy. Na povrch nitridované součásti dopadají ionty a dochází k vytvoření plazmatu, díky čemuž se uvolňuje atomární dusík a difunduje do povrchu nitridované součásti [37,98, 99].



Obr. 2.14. Modro-fialový výboj vzniklý během procesu plazmové nitridace [97].

2.4 Průběh teplotních polí

Ke správnému stanovení jakosti materiálu, druhu povlaků a součástí, na jejichž povrch se bude zkoumaný povlak nanášet, je nesmírně důležité znát průběh teplotních polí v průběhu lícího cyklu. Tlakově odlévaným kovem bude slitina hliníku $AlSi9Cu3$.

Průběhy teplotních polí během lícího cyklu jsou názorně vyobrazeny pro pohyblivou část formy na následujících obrázcích. Jsou vybrány pouze ty části simulace, při kterých dochází k dosažení největších teplotních výkyvům. Pro naše účely byl průběh simulace zjednodušen, protože je uvažováno, že v čase 0,00 s se roztavený kov (slitina hliníku) dostane do kontaktu s celou dutinou formy, což neodpovídá skutečnosti, ale pro naše účely je naprosto dostačující. Tato fáze lícího cyklu je znázorněna na obr. 2.15. Na obrázku 2.16 je vyobrazen teplotní průběh polí těsně před otevřením formy. Je zde jasně patrné nerovnoměrné namáhání částí

formy, především malých výstupků, jader a oblastí okolo vtoku. Tyto části formy nejčastěji podléhají zkáze vlivem uvedených faktorů v kapitole 1 této bakalářské práce. Po otevření formy následuje pozvolné ochlazování jednotlivých částí formy (obr. 2.17) až do doby, kdy je zahájen postřik formy separačním a chladícím prostředkem. Tato část je uvedena na obrázku 2.18. Z těchto obrázků je jasně zřejmá skoková změna teplot povrchů formy. Na posledním obrázku 2.19 je uveden průběh teplotních polí po ukončení postřiku separačním a chladícím prostředkem. Od tohoto okamžiku probíhá pozvolné ochlazování povrchu formy a návratu do výchozích hodnot, jaké jsou v čase 0,00 s. Celý lící cyklus u tohoto typu odlitku trvá 64,7 s. Je možné si povšimnout velkých změn teplot (cca 170 °C) v průběhu tohoto lícího cyklu.

Teplu vnesené do formy roztaveným kovem je postupně opět odváděno. Největší část tohoto tepla je odvedena společně s odlitkem při jeho vyjímání, dále také sáláním do okolí formy, chladícím médiem proudícím chladicími kanály, ale také přeměnou separační a chladicí kapaliny v páru.

Uvedené časy jsou pouze informativní a slouží pro lepší názornost průběhu teplotního zatěžování materiálu formy. Nelze je kvantifikovat na všechny druhy odlévaných součástí, protože jsou velice závislé na zvolené technologii, velikosti odlévané součásti a druhu odlévané slitiny.



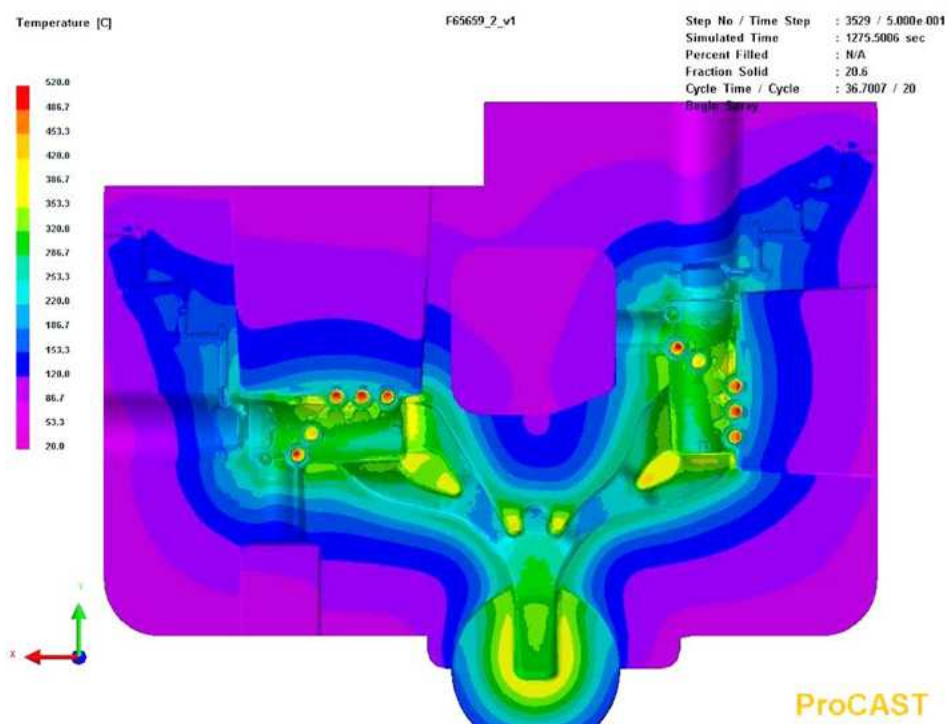
Obr. 2.15. Průběh teplotních polí před vstříknutím roztaveného kovu (čas blízký 0,00 s). [100]



Obr. 2.16. Průběh teplotních polí těsně před otevřením formy (čas 12,7 s). [100]



Obr. 2.17. Průběh teplotních polí těsně před zahájením postřiku chladícím a separačním postřikem (čas 36,2 s). [100]



Obr. 2.18. Průběh teplotních polí v čase provádění chladícího a separačního prostředku (čas 36,7 s). [100]



Obr. 2.19. Průběh teplotních polí po ukončení postřiku chladícím a separačním prostředkem (čas 37,7 s). [100]

2.5 Druhy použitých povlaků v našem experimentu

Při výběru druhu povrchové úpravy a typu zvoleného povrchu je nesmírně důležité zohlednit nejen druh materiálu, ale také průběh teplotních polí uvedených v předešlé kapitole 2.4.

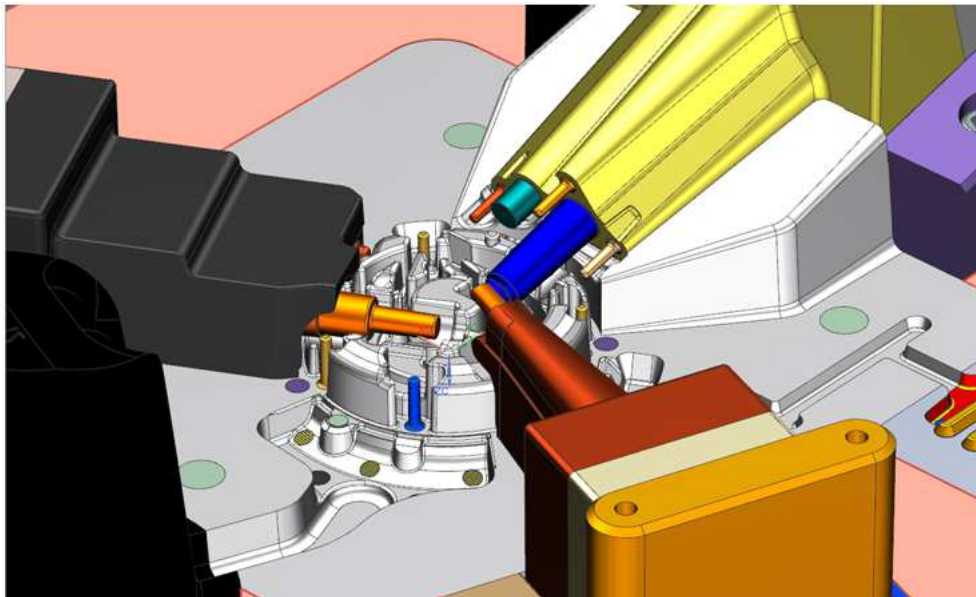
2.5.1. Základní údaje k experimentu

Experiment byl proveden na formě F65596. V tomto případě se jedná o jedno fazonovou formu. Experiment probíhal na vložce fazony 17, která byla vyrobena z materiálu Dievar s povrchovou úpravou nitridace do hloubky 0,05 mm a následným nanesením povlaku TiAlN technologií PVD.

Licí zařízení použité pro tento experiment Bühler Evolution 53 s uzavírací silou 5 300 N.

3 EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠKY

3.1 Experiment



Obr. 3.1. Na obrázku je znázorněno zaformování povlakované vložky ve formě [100].

Parametry lisování:

- Postřik: $s+v - 0,9s$,
- ofuk: 6%,
- tuhnutí: 8s,
- teplota kovu: 680°C,
- odlévaný materiál: AlSi12.

3.1.1. Stav povrchu vložky po 4 150 cyklech



Obr. 3.2. Stav povrchu povlakované vložky po 4 150 cyklech [100].

Stav povrchu:

- na povrchu vložky se začíná objevovat nalepení slitinou Al.

3.1.2. Stav povrchu vložky po 10 050 cyklech

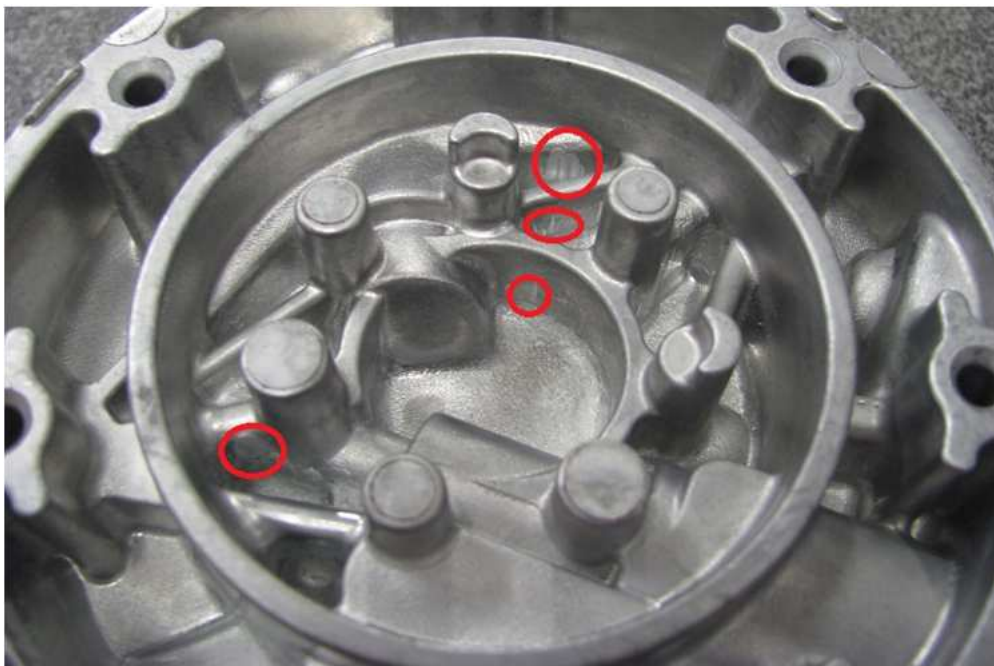
Obr. 3.3. Stav povrchu povlakované vložky po 10 050 cyklech [100].

Stav povrchu:

- po nalití série s 10 050 cykly vykazovala vložka na tvarové části a v části vakačního kanálu vysokou míru nalepení slitinou Al. Vložka byla vyjmuta z formy a převezena do nástrojárny k tryskání, čímž došlo k poškození naneseného povlaku a bylo zapotřebí vložku opět napovlakovat. Na vložce došlo k vyhodnocení problematických míst.

Parametry ručního tryskání v nástrojárně:

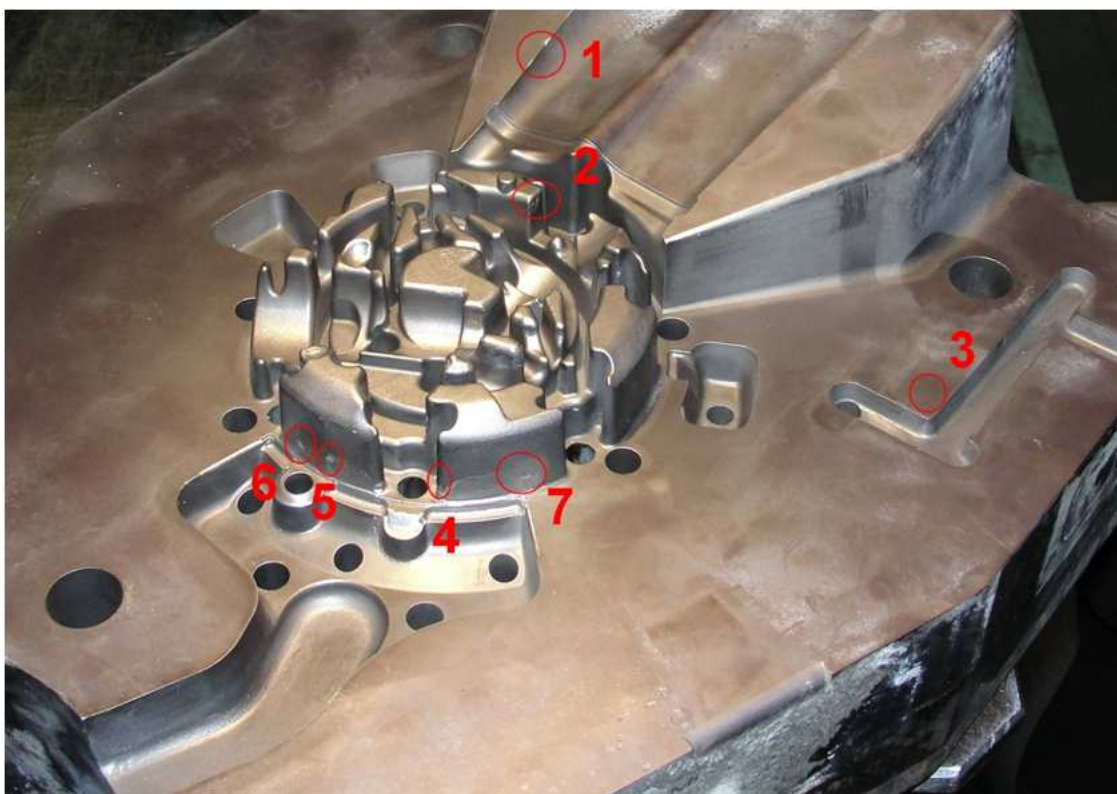
- drť korozivzdorná Graminax Cr 40,
- zrnitost 0,15÷0,20 mm,
- tvrdost 460÷800 HRC,
- tryskání probíhalo pod tlakem 0,6 MPa.



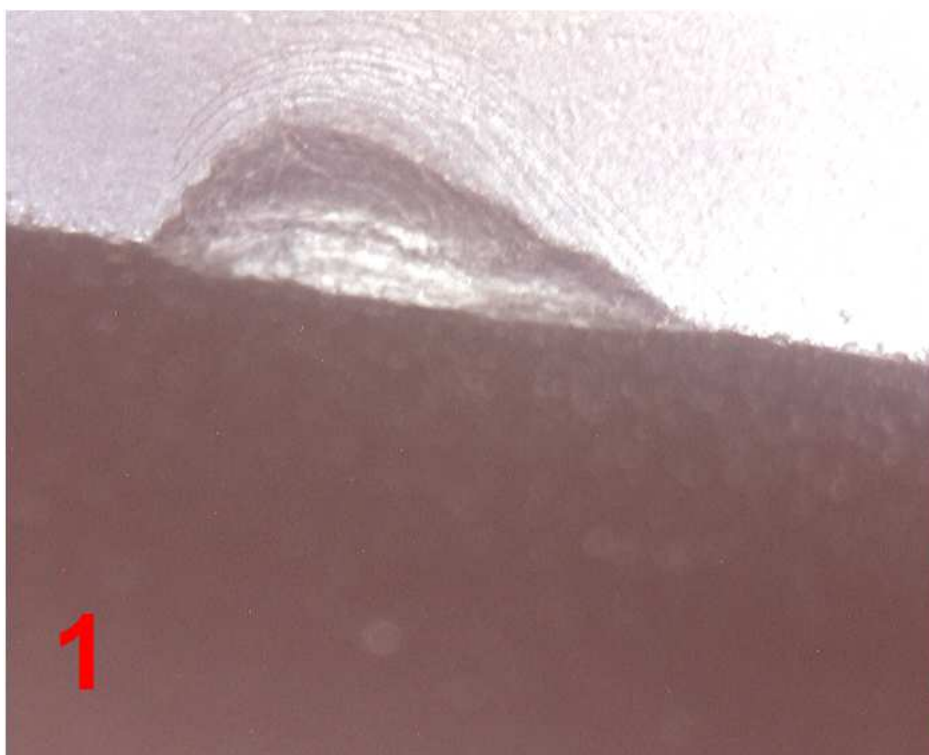
Obr. 3.4. Stav povrchu odlitku po 10 050 cyklech, poškození zvýrazněno červeně [100].



Obr. 3.5. Stav povrchu odlitku po 10 050 cyklech, poškození zvýrazněno červeně [100].



Obr. 3.6. Stav povrchu tvarové vložky po tryskání s označenými problematickými místy [100].



Obr. 3.7. Mechanické poškození vedení bočního jádra [100].



Obr. 3.8. Adhezní přilnutí slitinou Al [100].



Obr. 3.9. Neporušená oblast vložky v dělicí rovině formy – povlak v této části zachován [100].



Obr. 3.10. Mechanické poškození erozí [100].



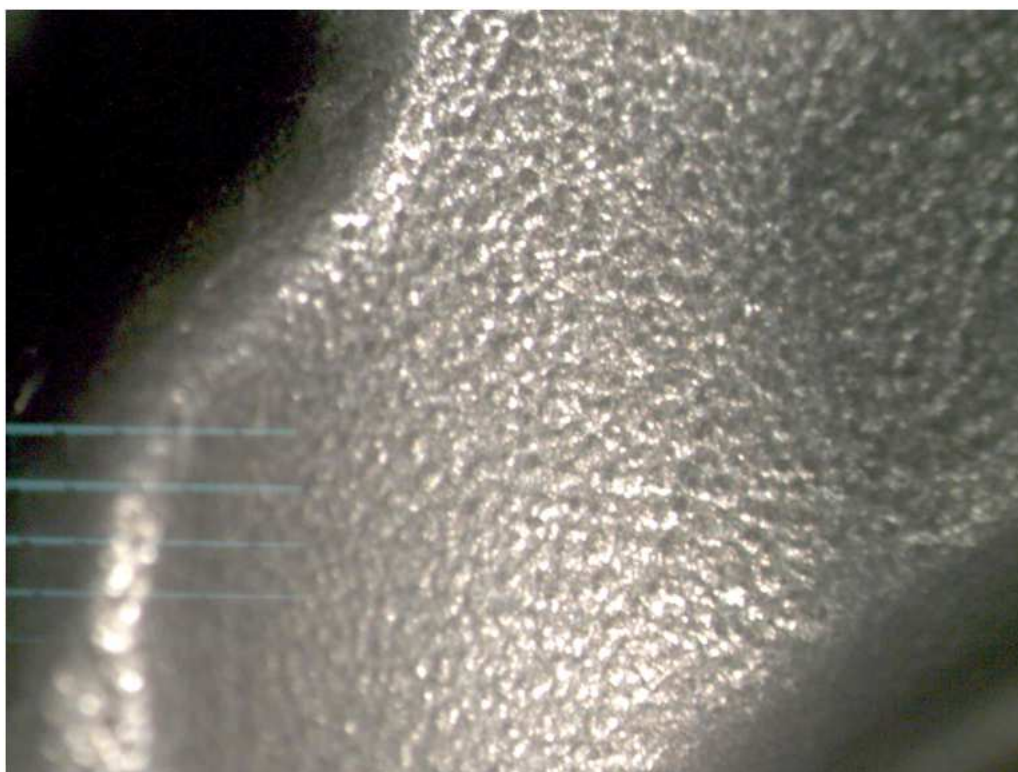
Obr. 3.11. Mechanické poškození proti vtoku v důsledku eroze [100].



Obr. 3.12. Mechanické poškození proti vtoku v důsledku eroze [100].



Obr. 3.13. Mechanické poškození proti vtoku v důsledku eroze [100].



Obr. 3.14. Tryskaný povrch – ve srovnání s obrázkem 3.9. je viditelný odlišný povrch v důsledku tryskání [100]

Zkoumáním povrchu pod mikroskopem bylo zjištěno, že byl zvolen špatný postup tryskání. Příští tryskání bude dle doporučení provedeno Oxidem Al – Al_2O_3 – o zrnitosti $7\div 11\text{ }\mu\text{m}$. Nejlepší způsob odstranění nalepeného Al je máčení vložky v roztoku NaOH (nedojde k porušení povlaku).

Po opětovném napovlakování byla tvarová vložka podrobena další licí sérii s 10 050 cykly. Po této sérii vykazovala vložka téměř totožné nalepení jako v předešlé sérii a byla odeslána k tryskání u dodavatele povlaku. Před tryskáním došlo k vyhodnocení poškození povlaku v průběhu licí série a bylo zjištěno poškození povlaku v některých místech, především proti vtoku, které bylo způsobeno erozí. V těchto místech byla poškozena i nitridovaná vrstva včetně základního materiálu.

Parametry ručního tryskání u dodavatele:

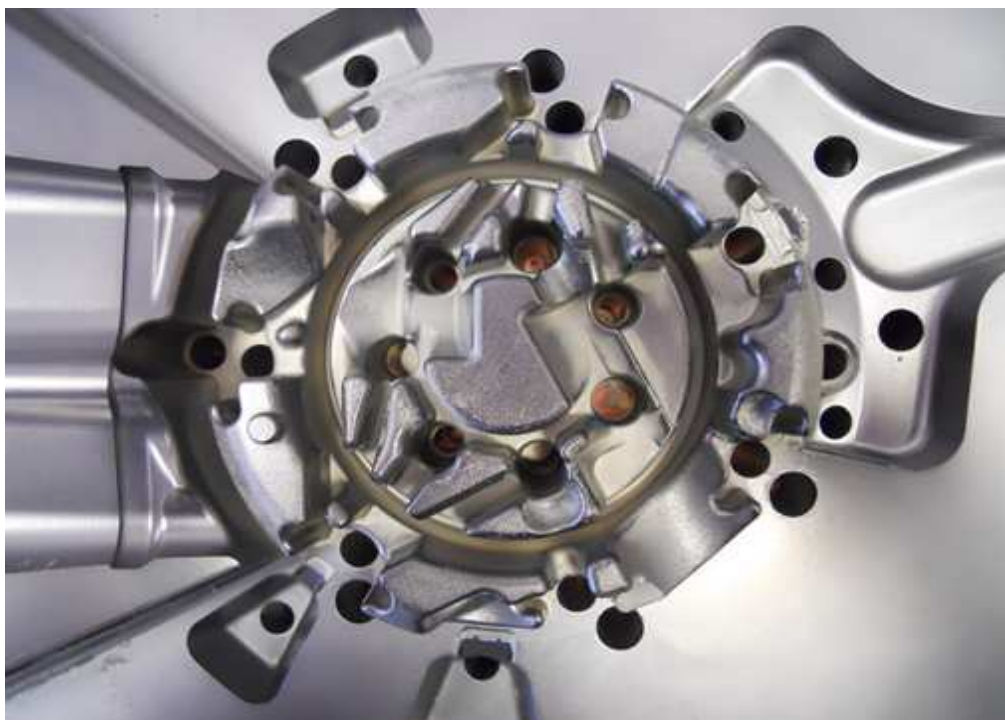
- oxid Al – Al_2O_3 ,
- zrnitost $7\div 11\text{ }\mu\text{m}$,
- tryskání probíhalo pod tlakem 0,3 MPa.



Obr. 3.15. Stav povrchu tvarové vložky po druhé licií sérii [100].



Obr. 3.16. Stav povrchu tvarové vložky po druhé licií sérii [100].



Obr. 3.17. Stav povrchu tvarové vložky po tryskáním Al_2O_3 [100].



Obr. 3.18. Stav povrchu tvarové vložky po tryskáním Al_2O_3 [100].



Obr. 3.19. Stav povrchu tvarové vložky po tryskáním Al₂O₃ [100].

Po tryskání jsou na povrchu tvarové vložky v místech proti vtoku dobře patrné zbytky nalepené slitiny Al, které nebyly odstraněny tryskáním. Na některých místech došlo k porušení povlakované vrstvy.

3.1.3. Porovnání s jiným typem povlaku



Obr. 3.20. Stav povrchu tvarové vložky z materiálu TQ1 s povlakem TiB₂ po 4 150 cyklech [100].



Obr. 3.21. Stav povrchu tvarové vložky z materiálu TQ1 s povlakem TiB₂ po 10 050 cyklech [100].

V průběhu lití došlo k destrukci tvaru proti vtoku a bylo nezbytné jeho vyvločkování. Tato malá vložka nebyla povrchově upravena. Po 10 050 cyklech se na vložce nacházelo jen nepatrné množství nalepené slitiny Al. Silné nalepení je znatelné na vyvločkované části proti vtoku, která nebyla povlakovaná. Důvod destrukce výstupku vložky nebyl zkoumán.

4 DISKUZE VÝSLEDKŮ

4.1 Získané výsledky z experimentu

Vlivem nalepení slitiny Al na tvarové vložce docházelo ke zhoršení výsledného povrchu odlitku, což je viditelné na obrázku 3.4 a 3.5. Nanesený povlak TiAlN s nitridací do hloubky 0,05 mm pod tímto povlakem ovlivnili míru nalepení slitiny Al na povrchu tvarové vložky oproti předchozí nepovlakované vložce. Během série 10 050 ks nebylo zapotřebí ani jednou čistit tvarovou vložku obsluhou stroje, čímž došlo ke zvýšení produktivity odlitků a snížení provozních nákladů oproti nepovlakované vložce, kde bylo nezbytné po cca 3 000 cyklech provádět ruční čištění vložky obsluhou přímo na stroji z důvodu velmi silného nalepení slitinou Al.

Mechanické poškození, které je viditelné na obrázku 3.7 není způsobené provozem, ale k jeho vzniku došlo během demontáže tvarové vložky z formy. Toto poškození nemá absolutně žádný vliv na funkčnost formy, protože v tomto místě nedochází ke styku s odlévaným kovem.

Poškození, které je patrné na obrázcích 3.10, 3.11, 3.12, 3.13 je způsobeno proudícím kovem do formy. Všechna tato poškození se nacházejí přímo v místě vtoku roztaveného kovu do formy. V tomto místě dochází k největšímu tepelnému namáhání formy v důsledku vysokých teplot proudícího kovu s následným prudkým ochlazením vlivem separačního a chladícího postřiku.

Již po odlití 4 150 cyklů (obr. 3.2) je možné sledovat postupné nalepování slitiny Al na tvarové části vložky. Toto nalepení se s množstvím licích cyklů zvyšuje a je viditelné na obrázcích 3.8, 3.15, 3.16. Jeho přítomnost je ovšem velmi nežádoucí, protože jeho vznikáním dochází k poškození ploch odlitku. Nelze ovšem jednoznačně říci, že nalepování je způsobené pouze povlakem TiAlN. Velkou měrou k tomuto faktu také přispívá množství a druh zvoleného separačního a chladícího postřiku a době jeho nanášení, dále pak na teplotě a typu odlévaného kovu a v neposlední řadě také zkušenosti obsluhy licího zařízení.

Nalepení slitiny Al se nepodařilo úplně odstranit ani zvoleným postupem tryskání, což je možné vidět na obrázcích 3.18, 3.19.

Lze tedy říci, že s počtem cyklů dochází ke zvyšování množství nalepeného kovu na tvarové části vložky. Bohužel se nepodařilo prokázat, jak velký vliv by toto nalepení mělo na životnost vložky a zda by způsobilo její destrukci či nikoliv. Abychom mohli toto prokázat, tak by muselo být provedeno více licích cyklů v tomto experimentu, což ovšem nebylo možné (nebyly požadovány další kusy zákazníkem).

Při užití vložky z materiálu TQ1 s povrchovou úpravou nitridací do hloubky 0,1 mm a naneseným povlakem TiB₂ bylo dosahováno mnohem lepších hodnot a to především nalepení povrchu vložky slitinou Al (viz obrázek 3.20, 3.21). Licí parametry a množství separačního a chladícího postřiku bylo totožné s naším experimentem.

ZÁVĚR

Dle získaných poznatků z literárních pramenů bylo vyhodnoceno, že používání CVD povlaků na nástrojích běžně užívaných při výrobě trvalých forem není v současné době možné vzhledem k příliš vysoké teplotě jejich nanášení ($950\div 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$). Při těchto teplotách se již dostáváme do austenitizačních teplot ocelí. V současné době nejužívanějšími povlaky jsou PVD, PACVD a povrchová úprava nitridací. Jejich použitím dochází dle našeho zjištění k prodloužení servisních intervalů, snížení množství oprav jednotlivých dílů a v neposlední řadě také ke zlepšení výsledného povrchu odlitku.

Použitím povlaku TiAlN na tvarové vložce formy při tlakovém lití slitiny AlSi12 došlo k prodloužení servisního intervalu o 300% oproti užití nepovlakované vložky.

V případě užití povlaku TiB₂ by byl oproti užití povlaku TiAlN tento servisní interval ještě prodloužen.

Experiment probíhal dvakrát po sobě a v jeho výsledcích po nalití 10 050 cyklů nebyly shledány významnější rozdíly.

Výsledky získané experimentem ukazují, že použitý povlak TiAlN není vhodný pro tlakové lití slitin hliníku. Ovšem nelze to říci jednoznačně, protože velkou měrou záleží na materiálu a tvaru povlakované součásti, licích parametech, konstrukci formy (především vhodně zvolené vtokové soustavě a způsobu vnitřního chlazení) a také na množství a druhu separačního a chladícího postřiku.

Oba experimenty byly provedeny na stejném licím pracovišti za použití totožných licích parametrů.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. KATEDRA STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE TUL. *Výroba odlitků ze slitin hliníku* [online]. 2010 [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/ksm/obsah/vyuka/MV-cv_3.pdf
2. LICHÝ, P. VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. *Speciální metody výroby odlitků* [online]. 2008 [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/cs/studium-a-vyuka/studijni-opory/632-Lichy-Specialni_metody.pdf
3. CASE WESTERN RESERVE UNIVERSITY CLEVELAND, OHIO. *GATING OF PERMANENT MOLDS FOR ALUMINUM CASTINGS* [online]. 2004 [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://metalcasting.govtools.us/reports/gating_aluminum_permanent_mold_castings.pdf
4. MCCANN SALES, INC. *PERMANENT MOLD PROCESS* [online]. 2005 [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.mccannsales.com/book/permanentmold.pdf>
5. HERMAN, Aleš, ZIKMUND, Petr, STUNOVÁ, Barbora. *Nástrojové materiály UDDEHOLM pro tlakové lití*, Výzkumná zpráva U12133/2009/001, vydaná na ČVUT v Praze, Fakultě strojní, Ústav strojírenské technologie, Praha, červenec 2009
6. HÝNEK, M. FAKULTA STROJNÍ ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY V PLZNI. *TLAKOVÉ LITÍ HLINÍKU* [online]. 2014 [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: https://www.kks.zcu.cz/projekty-ver-fin/OPVK_PU/KA_01_publikace/KA01-Tlakove-liti-hliniku.pdf
7. NADCA. *Tooling for Die Casting* [online]. 2012 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: http://www.diecastingdesign.org/standards/402_pdf/chapter02.pdf
8. BÜHLER AG. *Standard die casting processes*. [online]. 2008 [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: https://www.buhlergroup.com/global/en/downloads/Brochure_Standard_Processes_EN.pdf
9. Die casting machine - Carat - Bühler. Bühler [online]. 2015 [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/buhler/die-casting-machine-68538-598996.html>
10. ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 148 s. ISBN 80-214-2790-6.
11. ČVUT. *KONSTRUKCE FORMY PRO TLAKOVÉ LITÍ* [online]. 2005 [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/MPL/konstrukce_forem.pdf
12. RUŽBARSKÝ, J., J. PAŠKO a Š. GAŠPÁR. *Techniques of die casting*; Lüdenscheid : RAM-Verl., 2014. ISBN 978-3-942303-29-3.
13. HERMAN, . FAKULTA STROJNÍ ČVUT V PRAZE. *SQUEEZE CASTING – JEDNÁ SE O NOVOU TECHNOLOGII?* [online]. 2003 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://konference.tanger.cz/data/metal2003/sbornik/papers/38.pdf>
14. SCHWAM, D. *Improved Die Casting Process to Preserve the Life of the Inserts* [online]. 2012 [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://www.e-smarrt.org/FinalReports/Task3_4_ImprovedDieCastingProcess.pdf
15. MATISKOVÁ, D., Š. GAŠPAR a L. MURA. ACTA POLYTECHNICA HUNGARICA. *Thermal Factors of Die Casting and Their Impact on the Service Life of Moulds and the Quality of Castings* [online]. 2013 [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://www.uni-obuda.hu/journal/Matiskova_Gaspar_Mura_41.pdf
16. ČVUT. *NC stroje pro tlakové lití* [online]. 2005 [cit. 2015-05-10].

- Dostupné z: http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/MPL/NC%20stroje%20pro%20tlakov%C3%A9%20lit%C3%AD_v1.pdf
17. NOVÁ, Iva, Zdeněk HOŠEK a Iva NOVÁKOVÁ. *Rozvoj tlakového lití. MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: Vogel Publishing, roč. 2004, č. 5 [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/rozvoj-tlakoveho-liti.html>
 18. ELBEL, T. VŠB-TUO. *TEORIE A TECHNOLOGIE SLÉVÁRENSTVÍ* [online]. 2007 [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.fmml.vsb.cz/export/sites/fmml/cs/studium-a-vyuka/studijni-opory/632-Elbel-Teorie-slevarenskych-pochodu-BSUS.pdf>
 19. BONOLLO, F., J. URBAN a . Gravity and low pressure die casting of aluminium alloys: a technical and economical benchmark. *A L L U M I N I O E L E G H E* [online]. 2005, (1) [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.gruppofrattura.it/ors/index.php/aim/article/download/610/579>
 20. DE VOS, Patrick. *Příručka pro technology - Obrobitelnost. MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: Vogel Publishing, 2011, roč. 2011, č. 12 [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-obrobitelnost.html>
 21. PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
 22. *Elektrochemické obrábění, elektroerozivní obrábění* [online]. 2013 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: http://www.spstjbc.cz/spst_files/projekty/vyuka_v_cizim_jazyce/moduly/modul%20stt/de/sttn3_elektrochemicke%20obrabeni_elektroerozivni%20obrabeni.pdf
 23. BARCAL, J. *Nekonvenční metody obrábění: Skripta FS ČVUT*. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1989.
 24. ŘASA, J., KEREČANINOVÁ, Z. *Nekonvenční metody obrábění*. [online], kód článku: 070710. [cit. 2009-03-26]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni.html>
 25. MORÁVEK, Rudolf. *Nekonvenční metody obrábění*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, Tiskové středisko ZČU, 1999. 102 s. ISBN 80- 7082-518-9.
 26. *Informační materiály firmy Uddeholm: Electrical discharge machining of tool steel* [online]. 2006 [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: <http://www.uddeholm.com/products/uddeholm-dievar.php>
 27. Brejša, P.; Stolař, P.; Prikner, O. *Co má vědět konstruktér o tepelném zpracování* [prezentace]. [přednáška ze dne 12.2.2015, Praha]
 28. VUT V BRNĚ. *Technologie svařování* [online]. 2002 [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/technologie_vyroby_I__svarovani__kubicek.pdf
 29. ČVUT. *Svařování* [online]. 2011 [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/svarovani/UT_01_Prehled_svarovani_T08.pdf
 30. KUBÍČEK, Miroslav. *Svařování*. In: *Web.spssbrno.cz* [online]. 2013 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: http://web.spssbrno.cz/web/DUMy/STT,%20KOM/VY_32_INOVACE_21-03.pdf
 31. *Svařitelnost materiálů: Speciální technologie. ÚSTAV PŘÍSTROJOVÉ TECHNIKY AV ČR. ISI Brno* [online]. 2010 [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: http://ebt.isibrno.cz/svaritelnost-materialu#footnote1_ng1nyx5
 32. VUT V BRNĚ. *RENOVACE A POVRCHOVÉ ÚPRAVY* [online]. 2006 [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/renovace_a_povrchove_upravy__kubicek.pdf

33. ESAB. *Svařitelnost některých technických materiálů a volba přídatných materiálů* [online]. 2011 [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: http://bcz.vamberk.eu/CD_CZ_5_2011/PDF/1_pridavne_svarovaci/N/N1_svaritelnost_materialu.pdf
34. *Ochrana proti opotřebení a opravy svařováním, navařováním a* [online]. 2006 [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: http://www.bohler-uddeholm.cz/media/Opravy_a_navary.pdf
35. Renovace nástrojových ocelí navařováním. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2006, (4) [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/renovace-nastrojovych-oceli-navarovanim.html>
36. KOLAŘÍK, Ladislav. *Hodnocení svařitelnosti* [on-line]. [vyd. 2008-04-21]. Dostupné z: <http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TMSV/Svaritelnost.pdf>
37. HERMAN, Aleš, ZIKMUND, Petr, STUNOVÁ, Barbora. *Nástrojové materiály Schmolz Bickenbach pro tlakové lití*. Výzkumná zpráva U12133/2009/002, vydaná na ČVUT v Praze, Fakultě strojní, Ústav strojírenské technologie, Praha, červenec 2009
38. HUMÁR, A. *TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ* [online]. 2003 [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
39. ČEP, R. a J. PETRŮ. VŠB-TUO. *Experimentální metody v obrábění* [online]. 2011 [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: http://projekty.fs.vsb.cz/459/ucebniopory/Experimentalni_metody_%20v_obrabeni.pdf
40. BUMBÁLEK, Bohumil. 2005. *Integrita povrchu a její význam pro posouzení vhodnosti dané plochy pro její funkci* [online]. Brno [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2512_Bumbalek.pdf. Přednáška. VUT Brno.
41. KOČMAN, Karel. *Technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001, 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
42. SKOPEČEK, Tomáš, Petr HOFMANN a Michal ŠVANTNER. Zbytková pnutí při vysokorychlostním frézování. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2007, č. 5 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/zbytkova-pnuti-pri-vysokorychlostnim-frezovani.html>
43. KŘÍŽ, A. ZČU-PLZEŇ. *INTEGRITA POVRCHU V OBLASTI* [online]. 2009 [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/download/Integrita_prednaskaTZ.pdf
44. UDDEHOLM. *HEAT TREATMENT OF TOOL STEEL* [online]. 2013 [cit. 2015-05-08]. Dostupné z: <http://www.uddeholm.com/files/heattreatment-english.pdf>
45. OLSON, G.B. a M. COHEN. *Stress-Assisted Isothermal Martensitic* [online]. 1982 [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: http://srg.northwestern.edu/Publications%20Library/Journals/1982_Stress-AssistedIsothermalMartTrans-TRIP_steels.pdf
46. KRAUS, V. 2006. Tepelné zpracování a slinování. *Cvičení TZS - Ing. Kraus* [online]. [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://tzs.kmm.zcu.cz/TZSprcelk.pdf>
47. KORECKI, M., J. OLEJNIK, P. KULA a E. WOŁOWIEC. Meeting standards for die heat treatment. *International Heat Treatment and Surface Engineering* [online]. 2014, 8 (4): 183-187 [cit. 2015-05-05]. DOI: 10.1179/1749514814Z.000000000121. ISSN 1749-5148. Dostupné z: <https://www.secowarwick.com/assets/Documents/Articles/2014-IHT45-Meeting-standards-for-die-heat-treatment.pdf>
48. FIORESE, Elena, Franco BONOLLO, Giulio TIMELLI, Lars ARNBERG a Elisabetta GARIBOLDI. NEW CLASSIFICATION OF DEFECTS AND IMPERFECTIONS FOR ALUMINUM ALLOY CASTINGS. *International Journal of Metalcasting* [online]. 2015, 9 (1): 55-66 [cit. 2015-05-20]. ISSN 19395981.
49. EXPROHEF-CZ S.R.O. *Povrchové inženýrství forem pro tlakové lití Al* [online]. 2013 [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: <http://www.hef-durferit.cz/pdf/PIFPTLAI.pdf>

50. ORÁOWICZ, A.W. *Possibilities of improving the durability of pressure moulds* [online]. 2009 [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: <http://www.afe.polsl.pl/index.php/pl/243/possibilities-of-improving-the-durability-of-pressure-moulds.pdf>
51. BERNQCCHI, E. *PVD Coatings in Aluminium die Casting die and Jleel Forming Toolr* [online]. 2006 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://www.fracturae.com/index.php/MST/article/download/1017/971>
52. HOŘEJŠ, S. a P. CARBOL. VÚHŽ A.S. COATING CENTRUM. *Význam povlakování forem pro tlakové lití barevných kovů - povlaky PA CVD* [online]. TriboTechnika, 2010 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-22010/vyznam-povlakovani-form-pro-tlakove-liti-barevných-kovu-povlaky-pa-cvd.html>
53. LU, B.T. a J.L. LUO. Correlation between surface-hardness degradation and erosion resistance of carbon steel—Effects of slurry chemistry. *Tribology International* [online]. 2015, 83 (vol. 83): 146-155 [cit. 2015-05-19]. DOI: 10.1016/j.triboint.2014.11.008. ISSN 0301679x. Dostupné z: http://www.academia.edu/9697169/Correlation_between_surface-hardness_degradation_and_erosion_resistance_of_carbon_steel_Effects_of_slurry_chemistry
54. BÖHLER UDDEHOLM CZ S.R.O. 2014. *Böhler W300* [online]. [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://www.bohler.cz/czech/files/downloads/W300.pdf>
55. PRECIZ, S.R.O. 2012. *Převodník materiálů: Ocel 1.2343* [online]. [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <http://www.preciz.cz/sluzby-hlavni/material-normal/1.2343>
56. BÖHLER UDDEHOLM CZ S.R.O.,. 2006. *Dievar* [online]. [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: http://www.uddeholm.cz/za_tepla_pouziti.htm
57. UDDEHOLM. *Dievar* [online]. 2009 [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: http://assabmalaysia.com/Dievar_080801_Ed.pdf
58. *Dievar - Premium Hot Work tool steel* [online]. 2003 [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: <http://www.empiredie.com/empire-die-casting/resource-center/downloads/pdf/dievar.pdf>
59. JKZ BUČOVICE A.S. 2010. *Ocel nástrojová pro práce za tepla TQ1* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.jkz.cz/node/271>
60. KIND & CO ., EDELSTAHLWERK, KG. *High performance steels for Die casting* [online]. 2014 [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: http://www.kind-co.de/en/pdf/downloads_prospekte/Druckguss_GB14.pdf
61. MARTINOVSKÝ, Michal a Jan MÁDL. 2014. Vliv modifikátorů na obrobiteľnosť a vlastnosti Al-Si slitin. *Strojirenská technologie: časopis kateder obrábění a montáže a kateder příbuzných České a Slovenské republiky*. Ústí nad Labem: ÚJEP, (3,4). ISSN 1211-4162.
62. TRIMET PRAG S.R.O. 2006. *EN AB-46500* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://www.trimet.cz/cz/sv_EN_AB-46500.php
63. KLOBČAR, D., A. NAGODE, A. SMOLEJ a J. TUŠEK. FSW of aluminium alloy AlSi12. *RMZ--materials and geoenvironment: RMZ--materiali in geookolje* [online]. Ljubljana: Institute for Mining, Geotechnology, and Environment, 2013, (vol.60) [cit. 2015-05-13]. ISSN 1408-7073. Dostupné z: http://www.rmz-mg.com/letniki/rmz60/RMZ60_0183-0189.pdf
64. DOBRZAŃSKI, L.A., M. KREMZER a A. NAGEL. Aluminium EN AC – AlSi12 alloy matrix composite materials reinforced by Al₂O₃ porous preforms. *Archives of materials science and engineering* [online]. Gliwice, Poland: International OCSCO

-
- World Press, 2007, (10) [cit. 2015-05-12]. ISSN 1897-2764. Dostupné z: http://www.archivesmse.org/vol28_10/28104.pdf
65. HOŘEJŠ, Slavomír. 2008. Povlakování nástrojů metodou PACVD. *MM Průmyslové spektrum* [online]. (4) [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/povlakovani-nastroju-metodou-pacvd.html>
 66. VÚHŽ a.s. [online]. 2015 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <http://www.vuhz.cz/pages/cs/zamereni-firmy/s2/povlaky-pvd-pacvd-a-cvd/druhy-povlaku.php>
 67. PVD technologie. 2015. *Ionbond* [online]. [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://www.ionbond.com/cz/technologie/pvd/>
 68. BÖHLER UDDEHOLM CZ S.R.O., 2014. *PVD povlakování* [online]. [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <http://www.bohler-uddeholm.cz/media/PVD.pdf>
 69. *The eifeler Group* [online]. 2014 [cit. 2015-04-24]. Dostupné z: <http://www.eifeler.com/portfolio-2/pvd-layer-systems/>
 70. MATUŠKA, Martin. *Aplikace PVD povlaků pro frézování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 75s., Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Miroslav Píška CSc.
 71. HUMÁR, Anton. 2008. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM publishing, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
 72. HOLUBÁŘ, Pavel, Michal ŠÍMA a Ondřej ZINDULKA. 2005. Technologie úprav nástrojů před a po povlakování. *MM Průmyslové spektrum* [online]. (9) [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-uprav-nastroju-pred-a-po-povlakovani.html>
 73. CEMECON S.R.O. 2015. *Úprava mikrogeometrie ostří* [online]. [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://www.cemecon.cz/technologie/uprava-mikrogeometrie-ostri.aspx>
 74. Tenké vrstvy. 2006. *Oddělení Povrchového inženýrství* [online]. [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/tenke_vrstvy_sma.pdf
 75. CHEMPOINT. 2012. *Magnetronové naprašování* [online]. [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/magnetronove-naprasovani>
 76. *Oerlikon Balzers Coating* [online]. 2015 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <http://www.oerlikonbalzerscoating.com/bcz/cze/01-products-services/03-coating-technology/07-pacvd/indexW3DnavidW261.php>
 77. LIBRA, M. 2013. Naprašování tenkých vrstev. *Odborné časopisy - Časopis Elektro* [online]. (7) [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/naprasovani-tenkych-vrstev--14441>
 78. IHI HAUZER TECHNO COATING B.V. 2015. *Magnetron Sputtering* [online]. [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://www.hauzertechnocoating.com/en/plasma-coating-explained/magnetron-sputtering/>
 79. ENGINEER LIVE. 2013. *Magnetron sputtering cathodes* [online]. [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.engineerlive.com/content/18921>
 80. JÍLEK, M. a P. HOLUBÁŘ. 2014. Nový způsob řízení magnetronové depozice otěruvzdorných povlaků. *MM Průmyslové spektrum* [online]. (10) [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/novy-zpusob-rizeni-magnetronove-depozice-oteruvzdornych-povlaku.html>
 81. HOLUBÁŘ, P. 2013. 20 let vývoje průmyslových PVD technologií. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2013 (5) [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/20-let-vyvoje-prumyslovych-pvd-technologii.htm>
-

-
82. CEPLANT. 2014. *Magnetronové naprašování* [online]. [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: http://www.ceplant.cz/research/equipment/other/magnetron_sputtering_system/
 83. ZINDULKA, O. 2004. Moderní metody povlakování nástrojů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. (10) [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: http://www.shm-cz.cz/wp-content/uploads/2013/03/2004_10.pdf
 84. HOLUBÁŘ, P., M. JÍLEK a M. RŮŽIČKA. 2004. Moderní PVD povlaky pro řezné aplikace a tváření. *MM Průmyslové spektrum* [online]. (9) [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: http://www.shm-cz.cz/wp-content/uploads/2013/03/2004_09.pdf
 85. ZINDULKA, O. a M. ŠÍMA. 2004. Měření vlastností povlaků na nástrojích. *MM Průmyslové spektrum* [online]. (6) [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: <http://www.kom.tul.cz/to/sdilene/merenipovlaku.pdf>
 86. Současnost a trendy povlakování technologií PVD. 2003. *MM Průmyslové spektrum* [online]. (4) [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/soucasnost-a-trendy-povlakovani-technologie-pvd.html>
 87. CODDET, O. a kol. 2008. TripleCoatings - New Generation of PVD-Coatings for Cutting Tools. *JOURNAL OF MACHINE MANUFACTURING* [online]. (XLIX) [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: http://www.platit.com/sites/default/files/pdf/machine_manufacturing-triple_coating-_jan_2009-mobile.pdf
 88. Cselle, T., Coddet, O., Holubář, P., Jílek, M., Jílek, J., Luemkemann, A., Morstein, M. 2008. *Počítačová simulace růstu PVD povlaků a nová řada trojvrstevných povlaků*. *MM Průmyslové spektrum* [online]. (9) [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/pocitacova-simulace-rustu-pvd-povlaku-a-nova-rada-trojvrstevnych-povlaku.html>
 89. *Ionbond* [online]. 2015 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <http://www.ionbond.cz/cz/zakazkove-povlakovani/tvareni-vstrikovani/portfolio-povlaku/ionbondtm-35-fakta/>
 90. Rogl M., Kříž A., Beneš P. 2007. Teplotní degradace tenkých ořezavých vrstev [online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: <http://ateam.zcu.cz/download/rogl.pdf>
 91. TECHNICKÝ TÝDENÍK. 2006. SHM znamená svět tvrdých materiálů [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/shm-znamená-svet-tvrдых-materialu_18556.html
 92. *Ionbond* [online]. 2015 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <http://www.ionbond.cz/cz/technologie/pacvd/>
 93. *Oerlikon Balzers Coating* [online]. 2015 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <http://www.oerlikonbalzerscoating.com/bcz/cze/01-products-services/03-coating-technology/07-pacvd/indexW3DnavidW261.php>
 94. US RESEARCH NANOMATERIALS, INC. 2010. *Titanium Boride (TiB₂) Micropowder* [online]. [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <http://www.us-nano.com/inc/sdetail/198>
 95. ZIEMNICKA-SYLWESTER, Marta. 2013. TiB₂-Based Composites for Ultra-High-Temperature Devices, Fabricated by SHS, Combining Strong and Weak Exothermic Reactions. *Materials* [online]. 6 (5): 1903-1919 [cit. 2015-05-05]. DOI: 10.3390/ma6051903. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1944/6/5/1903/>
 96. L.A. Dobrzański, M. Staszuk, J. Konieczny, W. Kwaśny, M. Pawlyta, *Structure of TiBN coatings deposited onto cemented carbides and sialon tool ceramics*, Archives of Materials Science and Engineering 38/1 (2009) 48-54. Dostupné z: http://archivesmse.org/vol38_1/3817.pdf
 97. BÖHLER UDDEHOLM CZ S.R.O. - KALÍRNA VYŠKOV. 2014. *Kalírna v číslech* [online]. [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <http://www.kalirna-vyskov.cz/technologie/>
-

98. BODYCOTE PLC. 2014. *Vytvrzování povrchu bez kalení* [online]. [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <http://www.bodycote.cz/cs-CZ/services/heat-treatment/case-hardening-without-subsequent-hardening-operation.aspx>
99. BROŽ, P., J. VŘEŠŤÁL a J. SOPOUŠEK. 2004. *Chemicko-tepelné zpracování materiálů* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://www.sci.muni.cz/chemsekce/c8870/pdf/Uloha6_Chemtepzprac.pdf
100. Interní materiály firmy Kovolís Hedvíkov, a.s.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| Zkratka/Symbol | Jednotka | Popis |
|-----------------------|-----------------|--|
| C _e | % | uhlíkový ekvivalent |
| CVD | - | Chemical vapor deposition - chemická depozice z plynné fáze |
| EDM | - | Electric Discharge Machinig – elektroerozivní obrábění |
| HSC | - | vysokorychlostní tvrdé frézování |
| MIG | - | Metal Inert Gas |
| PACVD | - | Plasma Assisted Chemikal Vapour Depsotion - Chemická depozice vrstev za asistence plazmatu |
| PVD | - | Physical Vapour Deposition – fyzikální napařování |
| WIG | - | Wolfram-Inert-Gas - Wolfram-inertní-plyn |
| atd. | - | a tak dále |
| t | s | čas |